



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## Anàlisis de ruptures superficials a escala regional. Aplicació a l'episodi de pluges de 2013 a la Val d'Aran.

Treball realitzat per:

**Mònica Novell Morell**

Dirigit per:

**Marcel Hürlimann**

Grau en:

**Enginyeria Geològica**

Barcelona, 12 de juny de 2013

Departament d'Enginyeria del Terreny

**TREBALL FINAL DE GRAU**





*A la meva mare, per tot el seu suport  
quan més el necessitava.*

*Al Carles, per ajuda'm a trobar el camí  
en moments difícils i complicats.*

*Al David, company d'aventures en tots  
aquests anys de carrera i de per vida.*

*I per últim, però no menys important,  
moltes i moltes gràcies al Marcel, el meu tutor,  
per la seva guia, per les seves crítiques,  
per les seves aportacions i per la seva ajuda.*



## RESUM

Les pluges del 18 de juny de 2013 van sorprendre a la població de la Val d'Aran amb greus danys. L'increment de cabal i les mesures de contenció no van ser suficients per esmorteir la força amb què baixava el riu Garona. Aquesta classe d'episodis de pluges tan intenses provoquen un dels perills geològics més imprevisibles en zones d'alta muntanya: els corrents d'arrossegalls i esllavissades. Aquests fenòmens provoquen situacions de crisis en les poblacions properes, ja que poden malmetre infraestructures, nuclis urbans o els propis residents. Per tant, l'estudi i la prevenció d'aquests perills naturals és clau per poder mitigar la vulnerabilitat de les infraestructures i reduir l'exposició de béns i persones a elevats riscos. De manera que, un estudi previ per tal de conèixer la història de la zona i poder tenir una idea de possibles riscos és clau per a la construcció de mesures de contenció.

Així doncs, aquest treball es centra en l'anàlisi de les ruptures superficials que van haver-hi degut a les intenses pluges del 18 de juny de 2013. Utilitzant com a eina principal el nou model STEP-TRAMM, l'objectiu principal del treball és realitzar una sèrie d'anàlisis en les quals s'hauran variat algunes dades d'entrada, i així, es podran comparar els resultats obtinguts amb l'inventari de lliscaments reals que van haver-hi. La zona d'estudi sempre serà la mateixa i bàsicament es canviaran paràmetres que afecten al tipus de sòl i a la vegetació.

Relacionant els resultats obtinguts amb STEP-TRAMM i les posicions reals dels lliscaments es podrà comprovar com influencia cada tipus de sòl a la zona d'estudi, les seves propietats i veure quin paper juga la vegetació. Un cop realitzats totes les anàlisis, ja es veu que no tots els tipus de sòls s'ajusten a la situació que es va donar, només un d'ells, *loam*, és el que més s'hi aproxima. A més, es varien paràmetres referents a les propietats hidràuliques del sòl, com el grau de saturació inicial de l'aigua o també d'altres relacionats amb la vegetació, com la força a tracció de les arrels. El resultat de les simulacions amb STEP-TRAMM és una matriu amb el valor de la probabilitat de que es donin lliscaments per cada punt de l'espai de la zona d'estudi.



## **ABSTRACT**

The heavy rains on 13th June 2013 surprised the Val d'Aran residents and caused severe damage. The protection measures were not enough to mitigate the power with which the Garona River was coming down, due to the increase of its flow discharge. The processes related to this rainy episodes (landslides and debris flows) are ones of the most dangerous geological risks in high mountain areas. These phenomena caused warning situations in nearby towns, as it provoked damages to infrastructures, urban centers or residents themselves. Therefore, the study and prevention of these natural hazards is key to decrease vulnerability of infrastructures and reducing the exposure of goods and people at high risks. So, a previous study to know the history of an area and being aware if geological risks are possible, it is important when constructing protection measures.

Therefore, this work focuses on the analysis of shallow landslides due to the intense rainfall on 18 June 2013. Using the new STEP-TRAMM model as the fundamental tool, the main objective of the project is to carry out some analyzes, modifying some inputs parameters. Thus, the results obtained along with the geographic location of real slides can be compared. The study area will always be the same and basically the changing parameters will affect the type of soil and vegetation.

According to the results obtained with STEP-TRAMM and the real landslide positions, it can be established how affects each type of soil and its properties in the study area and also see what role plays the vegetation. Once all the analyses have been carried out, it can be proved that not all types of soils fit with the current situation in Val d'Aran, just one of them, loam soil, is the closest to it. In addition, other parameters will be modified like some related to the hydraulic properties of the soil, like initial water saturation or other vegetation parameters like root strength. The result of the simulations with STEP-TRAMM consists in a grid with the values of probability for landslides events for each point in the space within the study area.



# ÍNDIX

ÍNDIX .....	6
1 INTRODUCCIÓ .....	12
2 CLASSIFICACIÓ DELS MOVIMENTS DE MASSA.....	13
3 DESCRIPCIÓ DE LA ZONA D'ESTUDI .....	21
3.1 Context Geogràfic .....	21
3.2 Context Geològic .....	22
4 DESCRIPCIÓ DE L'EPISODI DEL JUNY DE 2013 .....	24
4.1 Característiques meteorològiques.....	24
4.1.1 Temperatura.....	24
4.1.2 Mantell nival .....	25
4.1.3 Precipitació .....	26
4.2 Valoració climàtica diària.....	27
4.3 Conseqüències de l'episodi.....	28
4.3.1 Cartografia dels efectes geomorfològics.....	31
5 METODOLOGIA.....	34
5.1 Treball de camp.....	34
5.2 Sistema d'Informació Geogràfica.....	37
5.2.1 Aplicacions del SIG .....	38
5.2.2 Quantum GIS.....	38
5.2.3 Ús d'ortofotos.....	38
5.3 STEP TRAMM: Soil and Terrestrial Environmental Physics Triggered Rapid Mass Movements .....	39
5.3.1 Descripció del model.....	39
5.3.2 Predicció dels corrents d'arrossegalls amb STEP-TRAMM.....	41
5.3.3 Dades d'entrada .....	41
5.3.4 Dades de sortida.....	45
5.4 Sector analitzat.....	46
5.4.1 Dades fixes.....	47
5.4.2 Inputs variables.....	51
5.4.3 Cost computacional.....	52
6 Resultats .....	54
6.1 Influència del tipus de sòl .....	55



6.2	Influència de la força a tracció de la vegetació .....	59
6.3	Influència del grau de saturació inicial de l'aigua .....	63
6.4	Influència del gruix del sòl.....	67
7	Conclusions.....	71
8	Perspectives .....	72
9	Bibliografia .....	73
Annex	.....	75



## ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1: Representació d'un lliscament translacional. Font: <a href="http://prontubeam.com/Pag_cada_curiosidad.php?Id_curiosidad=55">http://prontubeam.com/Pag_cada_curiosidad.php?Id_curiosidad=55</a> .....	14
Figura 2: Dibuix d'un lliscament rotacional. Font: Corominas i García Yagüe, 1996. ....	14
Figura 3: Dibuix d'un desprendiment i un col·lapse. Font: Corominas i García Yagüe, 1996. ....	15
Figura 4: Il·lustració d'un desplaçament lateral per liquèfacció. Font: Corominas i García Yagüe, 1996. ....	15
Figura 5: Il·lustració d'un desplaçament lateral per fluència del material inferior. Font: Corominas i García Yagüe, 1996. ....	15
Figura 6: Dibuix d'una volcada per flexió i una caiguda, respectivament. Font: Corominas i García Yagüe, 1996. ....	16
Figura 7: Dibuix d'una allau de pedres. Font: Corominas i García Yagüe, 1996. ....	17
Figura 8: Representació d'una colada de terra. Font: Corominas i García Yagüe, 1996. ....	17
Figura 9: Dibuix del procés de reptació. Font: Corominas i García Yagüe, 1996. ....	17
Figura 10: Dibuix del procés de solifluxió. Font: Corominas i García Yagüe, 1996. ....	18
Figura 11: Representació del procés de cops de sorra i llim. Font: Corominas i García Yagüe, 1996. ....	18
Figura 12: Representació d'un corrent d'arrossegalls. Font: Corominas i García Yagüe, 1996. ....	18
Figura 13: Dibuix on es veu les diferents parts d'un corrent d'arrossegall. Font: Prontubean. ....	19
Figura 14: Mapa de la localització de la comarca de la Vall d'Aran i la zona d'estudi marcada. Font: Wikipedia. ....	21
Figura 15: Context geogràfic de la zona d'estudi. Font: Google Maps .....	22
Figura 16: Mapa geològic de la zona d'estudi, Vall d'Aran. Font: ICGC. ....	23
Figura 17: Aflorament de pissarres massives. ....	23
Figura 18: Diferència entre la temperatura mitjana mensual i la climàtica, a la primavera de 2013. Font: Servei Meteorològic de Catalunya. ....	24
Figura 19: Gràfic que compara els valors de la fusió nival amb la temperatura mitjana al llarg del mes de juny de 2013. Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat i altres. ....	25
Figura 20: Gràfica que mostra el gruix de neu [cm] a l'estació de la Bonaigua (2.226 m, Val d'Aran). Font: ICGC. InfoGruixNEU .....	25
Figura 21: Precipitació acumulada a l'estació meteorològica de Vielha e Mijaran (Val d'Aran). Font: ruralcat.gencat.cat. ....	26
Figura 22: Distribució de la precipitació (mm) acumulada entre els dies 17 i 19 de juny. . Font: Servei Meteorològic de Catalunya. ....	27
Figura 23: Acumulació de sediments (2.000 m <sup>3</sup> ) al barranc de Salider (Vall d'Aran). Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat i altres. ....	29
Figura 24: Edifici arrossegat pel desbordament de la Garona a Salardú (Val d'Aran). Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat i altres. ....	30





Figura 25: Inundació en una zona urbana. L'aigua de la Garona arriba fins a locals comercials a Vielha e Mijaran (Val d'Aran). Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat i altres.....	30
Figura 26: Danys en el medi natural a causa de la crescuda de la Garona. Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat i altres.....	31
Figura 27: Crescuda del riu Garona. Part de la cartografia de l'àrea inundada, escarpaments i superfícies inundades, a Gessa (Val d'Aran). Font: Institut Geològic de Catalunya.....	32
Figura 28: Mapa superior: situació general de la zonales localitzacions marcades d'on es van prendre les mesures. Font: GoogleMaps©.....	35
Figura 29: Fotografia on es veuen les arrels dels pins en un talús vora el camí. ....	36
Figura 30: Fotografia on es veuen les arrels dels roures vora el camí.....	36
Figura 31: Ortofoto amb els moviments de massa marcats. Val d'Aran (juny del 2013). Escala 1:320.000. Font: <a href="http://www.ortoxpres.cat/client/icc/">http://www.ortoxpres.cat/client/icc/</a> .....	39
Figura 32: Representació de les columnes hexagonals i els enllaços entre elles.....	41
Figura 33: Mapa de la zona general amb els lliscaments i la zona d'estudi marcats. Escala: 1:270.000. Font: <a href="http://www.ortoxpres.cat/client/icc/">http://www.ortoxpres.cat/client/icc/</a> .....	46
Figura 34: Zona d'estudi amb els corresponents lliscaments. Escala: 1:40.000. Font: <a href="http://www.ortoxpres.cat/client/icc/">http://www.ortoxpres.cat/client/icc/</a> .....	47
Figura 35: Model Digital d'Elevacions de l'àrea d'estudi. Escala: 1:40.000. Font: UPC .....	48
<i>Figura 36: Mapa marcat amb la zona boscosa. Font: CREAF.....</i>	48
Figura 37: Interpolació de les dades de precipitació acumulada. Escala: 1:70.000.	49
Figura 38: Hietograma de l'episodi de pluges del juny de 2013 a Vielha e Mijaran. Font: Servei Meteorològic de Catalunya. ....	50
Figura 39: Mapa de pendents de la zona d'estudi. Escala: 1:30.000. Font: ICGC .....	54
Figura 40: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com a sòl: argila. ....	56
Figura 41: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com a sòl: llims.....	56
Figura 42: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com a sòl: loam.....	57
Figura 43: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com a sòl: arxius descarregats de Soil Grids.....	58
Figura 44: Gràfica que mostra la relació entre el percentatge dels punts d'esllavissades i la probabilitat de ruptura dels enllaços.....	59
Figura 45: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor de la força a tracció de la vegetació: 10 kPa. ....	60
Figura 46: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor de la força a tracció de la vegetació: 1.000 Pa....	61
Figura 47: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor de la força a tracció de la vegetació: 100 Pa. ....	62
Figura 48: Gràfica que mostra la relació entre el percentatge dels punts d'esllavissades i la probabilitat de ruptura dels enllaços.....	63
Figura 49: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor del grau de saturació inicial de l'aigua: 0.15.....	64



Figura 50: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor del grau de saturació inicial de l'aigua: 0.35.....	65
Figura 51: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor del grau de saturació inicial de l'aigua: 0.50.....	66
Figura 52: Gràfica que mostra la relació entre el percentatge d'esllavissades i la probabilitat de ruptura dels enllaços.....	67
Figura 53: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor gruix del sòl: 0.50 m.....	68
Figura 54: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor gruix del sòl: 1 m.....	69
Figura 55: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor gruix del sòl: 2 m.....	70
Figura 56: Gràfica que mostra la relació entre el percentatge d'esllavissades i la probabilitat de ruptura dels enllaços.....	70
Figura 57: Mapa on es mostra el grau de probabilitat de ruptura dels enllaços a l'àrea del poble de Vielha e Mijaran. Escala: 1:36.000 .....	72



## ÍNDEX DE TAULES

Taula 1: Quantitats enregistrades a les EMA entre els dies 17 i 18 de juny. Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat i altres.....	26
Taula 2: Quantitats enregistrades (precipitació, en mm) a les EMA gestionades pel SMC entre els dies 17 i 19 de juny. Font: Servei Meteorològic de Catalunya. ....	28
Taula 3: Cabals enregistrats en les EMA. Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat i altres.....	29
Taula 4: Resultats obtinguts de l'estudi a la Garona. Font: Institut Geològic de Catalunya.....	32
Taula 5: Taula amb les mesures preses en les arrels dels diferents arbres.....	37
Taula 6: Força a tracció de les arrels per cada tipus d'arbre. ....	37
Taula 7: Propietats hidràuliques associades a cada tipus de sòl. Font: [Lehmann, P., et al 2018.] .....	43
Taula 8: Tipus d'arxius, informació que contenen i font de cada input necessari....	45
Taula 9: Dades de precipitació acumulada del dia 18 de juny. Font: Servei Meteorològic de Catalunya.....	49
Taula 10: Dades de la precipitació acumulada a Vielha i a la zona d'estudi: Font: Servei Meteorològic de Catalunya .....	50
Taula 11: Rang de percentatge de cada tipus de sòl en la zona d'estudi. Font: Soil Grids.....	51
Taula 12: Taula amb les dades dels anàlisis referents a la influència del sòl.....	55
Taula 13: Taula amb les dades dels anàlisis referents a la influència de la vegetació. ....	59
Taula 14: Taula amb les dades dels anàlisis referents a la influència del grau de saturació inicial de l'aigua. ....	63
Taula 15: Taula amb les dades dels anàlisis referents a la influència del gruix del sòl .....	67
Taula 16: Mesures preses a camp sobre la mida del diàmetre de les arrels. Aplicació de la fórmula per calcular la força a tracció de la vegetació en el sòl i el valor mitjà resultant. ....	75
Taula 17: Valors pluviomètrics de l'estació de Vielha e Mijaran. Juny del 2013. Font: SMC.....	76



# 1 INTRODUCCIÓ

Les zones d'alta muntanya són especialment susceptibles a patir alteracions morfològiques degut als canvis en la meteorologia, especialment episodis d'intenses pluges. Les precipitacions indueixen la formació espontània de moviments de massa, els quals són altament perillosos. Cal destacar, que aquests perills naturals tenen un risc associat, el qual depèn de la seva magnitud, la freqüència i el potencial destructiu. A part dels moviments de massa, les pluges provoquen inundacions en zones urbanes, les quals queden malmeses i poden afectar a la vida dels residents.

Per tant, és necessari l'estudi dels tipus de riscos geològics més freqüents en cada zona per tal de definir un període de retorn, conèixer les zones amb més perill i poder-hi evitar futures construccions en aquestes àrees.

El següent projecte es basa en l'anàlisi de l'episodi de pluges dels dies 17, 18 i 19 de juny de 2013 a la Val d'Aran, concretament el dia 18. L'estudi es centra en una zona concreta de la Val d'Aran i al ser una àrea massa extensa, doncs s'ha optat per disminuir-la.

L'objectiu principal del projecte es basa en la realització de diferents anàlisis mitjançant el model STEP-TRAMM, en els quals s'hauran fixat uns paràmetres i d'altres s'hauran variat per tal de tenir diferents resultats. Així, aquests resultats es podran comparar entre ells i amb l'inventari de lliscaments reals que van haver-hi. A més, es podran identificar quines són les àrees més susceptibles en patir moviments de massa i com és pot aplicar aquesta idea a futures campanyes de prevenció de riscos.

El següent treball s'ha dividit en tres blocs:

En primer lloc una definició bàsica dels diferents riscos geològics que es poden donar en zones d'alta muntanya. A més, l'explicació de la situació que es va donar al juny de 2013 a la Val d'Aran, amb fotografies i dades recopilades en aquells mesos per tal d'entendre la situació.

En segon lloc, es comenta el context geològic i geogràfic de la zona. Es defineix exactament quina és la zona analitzada i les seves característiques. D'altra banda, l'explicació del model emprat en aquest treball i totes les dades necessàries per al seu funcionament. També, l'aclariment de quines dades s'han definit com a fixes i quines altres com a variables.

Per últim, la visualització de les simulacions i la interpretació dels resultats obtinguts, dels quals se n'obtidran gràfics i se'n podran treure conclusions.



## 2 CLASSIFICACIÓ DELS MOVIMENTS DE MASSA

Els moviments de massa es defineixen com un reajustament del terreny per aconseguir l'equilibri degut a un canvi en les condicions del seu ambient, ja siguin climàtiques o geològiques [Vallejo, 2002].

Aquests fenòmens es caracteritzen per una sèrie de factors condicionants, com per exemple la seva magnitud i la velocitat. Els detonants d'aquests processos venen donats per l'acció de la gravetat, la meteorització, la resistència al tall del terreny, condicions climatològiques i altres condicions naturals i ambientals.

El dinamisme que succeeix en els vessants pot arribar a considerar-se un moviment d'alt risc geològic, ja que el mateix medi natural o zones urbanes poden quedar-ne alterats. D'aquesta manera, per intentar evitar o mitigar els efectes negatius dels moviments de massa es imprescindible conèixer els materials del sòl, les propietats geològiques, geomecàniques i hidrològiques de la zona; cal també tenir en compte factors externs que podrien desencadenar un d'aquests processos, com ara l'acció humana o la climatologia.

Tots els processos existents es poden classificar segons el material involucrat, el seu mecanisme, tipus de trencada, quantitat d'aigua en el terreny, la velocitat i la magnitud del moviment. D'aquesta manera, existeixen nombroses classificacions pels moviments de massa, no obstant, les més acceptades són: la Classificació de Hutchinson (1988) i la de Cruden i Varnes (1996); ambdues es basen en les característiques cinemàtiques dels moviments. Addicionalment, la classificació creada per Corominas i García (1997) permet classificar els diferents tipus d'esllavissades segons el mecanisme de trencament, obtenint així els següents cinc mecanismes principals, que són descrits detalladament a continuació:

### 1- LLISCAMENTS (Slides)

Moviment d'una massa rocosa o d'una formació superficial que llisca respecte el substrat rocós sobre una o varies superfícies de tall, ja que es supera la resistència al tall d'aquestes superfícies. Normalment, un dels factors visibles que ens insinua una futura possible esllavissada són les esquerdes superficials, per les quals finalment é per on acabarà de lliscar la massa. Els blocs lliscants poden tenir una velocitat i un volum variable, els quals vindran condicionats pel pendent del vessant. Cal esmentar, que l'aigua hi juga un paper fonamental, ja que d'una banda incrementa el pes de la massa lliscant, però d'altra banda disminueix el coeficient de fricció intern en la superfície de tall. Per aquest mateix motiu, les esllavissades són més freqüents en èpoques de pluges.

Existeixen dues classes de lliscaments de terres segons la forma de la superfície lliscant, la seva trajectòria i de la cohesió dels materials involucrats.

- Lliscaments translacionals: es dona quan els materials llisquen seguint un pla paral·lel a la superfície del talús, la qual és més o menys plana o lleugerament



ondulada. Per tant, la component rotacional és mínima i el lliscament succeeix a favor dels plans de discontinuïtats que hi poden haver en les roques, tal com falles, juntes, exfoliació o diàclasis (Figura 1).

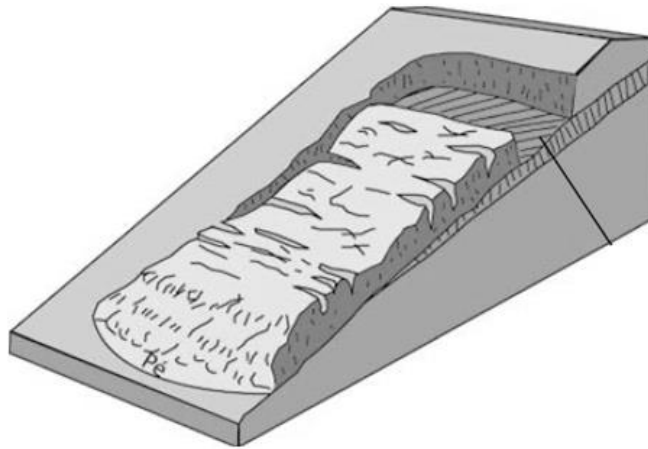


Figura 1: Representació d'un lliscament translacional. Font:  
[http://prontubeam.com/Pag\\_cada\\_curiosidad.php?Id\\_curiosidad=55](http://prontubeam.com/Pag_cada_curiosidad.php?Id_curiosidad=55)

- **Lliscaments rotacionals:** es tracta de moviments de massa més o menys rotacionals, al voltant d'un eix que és paral·lel a les corbes de nivell del vessant, i que implica un desplaçament de cisalla (lliscament) al llarg d'una superfície còncava, la qual és visible o es pot reconèixer sense dificultat. A la part superior del vessant es creen unes fractures per les quals comença el desprendiment de blocs. Un cop iniciat el trencament, la massa lliscant comença a girar; a més, es pot desintegrar en varis blocs a causa de les esquerdes existents o del baix grau de cohesió del material (Figura 2).



Figura 2: Dibuix d'un lliscament rotacional. Font: Corominas i García Yagüe, 1996.

## 2- DESPRENDIMENTS O CAIGUDES (Falls)

Succeeix quan una massa de roques es desprèn d'un talús abrupte, mitjançant una superfície de tall normalment petita. Si la cara del vessant afectat és vertical, els materials descendeixen per caiguda lliure i un posterior rebot i rodolament; en canvi, si el pendent del vessant és més notable, els materials llisquen i rodolen. Aquesta caiguda de materials és freqüent en escarps, penya-segats i en parets rocoses en general, i passa de manera ràpida degut als plans de discontinuïtat existents, com ara el contacte entre materials o esquerdes de tracció (Figura 3).



Altrament, s'anomena col·lapse quan la part inferior d'una columna és disgrega degut a un riu, meteorització o l'onatge, aleshores tota la columna és desprèn de la paret rocosa (Figura 3).

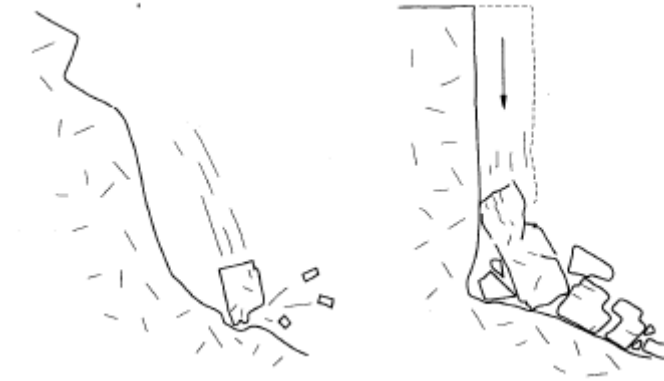


Figura 3: Dibuix d'un desprendiment i un col·lapse. Font: Corominas i García Yagüe, 1996.

### 3- DESPLAÇAMENTS LATERALS (Lateral Spreads)

Fa referència al tipus de moviment que tenen una sèrie de blocs rocosos o un sòl molt compactat sobre una capa de material tou i deformable. Aquests desplaçaments poden ser causats per diferents motius: d'una banda la pèrdua de resistència del material subjacent, el qual flueix o es deforma a causa de l'elevat pes dels blocs superiors; en altres paraules, la líquefacció del material inferior (Figura 4). D'altra banda, quan una capa d'argiles toves i humides flueix i llisca ja que està situada sota materials més pesants (Figura 5).



Figura 4: Il·lustració d'un desplaçament lateral per líquefacció. Font: Corominas i García Yagüe, 1996.



Figura 5: Il·lustració d'un desplaçament lateral per fluència del material inferior. Font: Corominas i García Yagüe, 1996.





#### 4- VOLCADES (*Topples*)

Segons Corominas i García Yagüe (1997) les volcades són moviments de rotació cap a l'exterior, d'una unitat o un conjunt de blocs, al voltant d'un eix pivotant situat per sota del centre de gravetat de la massa en moviment. Els blocs són desestabilitzats per la força de la gravetat i l'empenta que crea el terreny a causa de l'aigua, el gel o altres fluids existents en les esquerdes. Hi ha dos processos diferents pel que fa a les volcades:

- Volcada per flexió: en un sistema ple de discontinuïtats, les columnes es dobleguen cap endavant i trenquen per flexió. Típica trencada en esquists, fil·lites, pissarres i en seqüències de materials molt estratificats (Figura 6).
- Caiguda: la part més debilitada cau seguint un moviment de gir, recolzat en la seva base externa. Es sol donar en penya-segats rocosos o de material sedimentaris compactats (Figura 6).

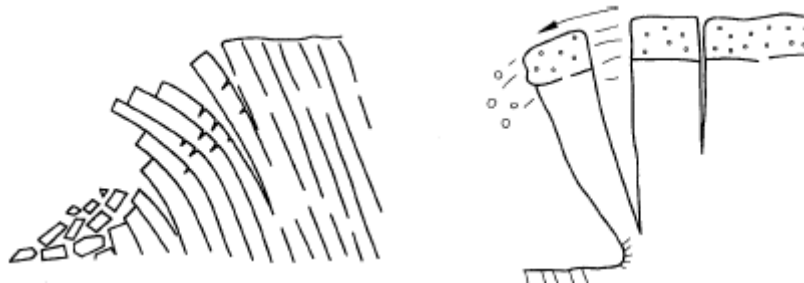


Figura 6: Dibuix d'una volcada per flexió i una caiguda, respectivament. Font: Corominas i García Yagüe, 1996.

#### 5- FLUXOS (*Flows*)

Moviments d'una massa desorganitzada o barrejada on no totes les partícules es desplacen a la mateixa velocitat ni tampoc les seves trajectòries han de ser paral·leles. Degut a aquestes característiques, la massa mobilitzada no conserva la seva forma durant el descens, ja que va adoptant morfologies lobulades [Corominas, 1989].

La següent classificació dels fluxos es basa en la capacitat destructiva d'aquests:

- Allaus de pedres (*Rock Avalanches*): caigudes, a gran velocitat, de blocs de roca que es desprenen de la paret del vessant. Les allaus són resultat dels lliscaments o desprendiments de gran magnitud, degut al fort pendent, la falta d'estructura i cohesió dels materials involucrats, l'aigua de les precipitacions o moviments sísmics (Figura 7).



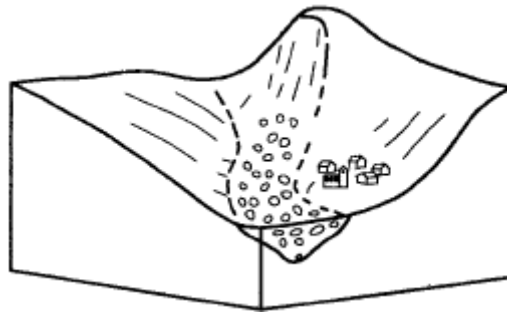


Figura 7: Dibuix d'una allau de pedres. Font: Corominas i García Yagüe, 1996.

- Colades de terra (Earth Flows): deformació plàstica i lenta que es dona en materials fins i homogenis, com pissarres o fil·lites, en vessants amb un pendent moderat. Quan els materials són detrítics, com llims o argiles, s'anomena colades de fang, les quals adopten una forma de elongada (Figura 8).

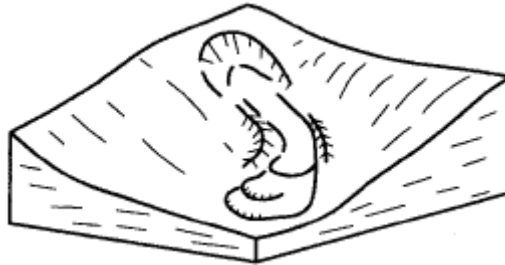


Figura 8: Representació d'una colada de terra. Font: Corominas i García Yagüe, 1996.

- Reptació (Creep): moviment extremadament lent, perceptible al cap d'uns anys. L'activitat disminueix amb la profunditat (Figura 9).

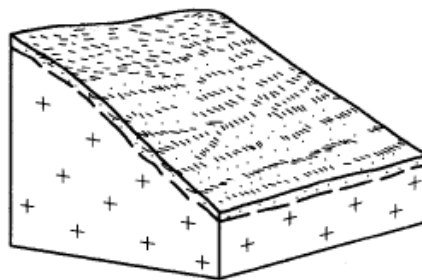


Figura 9: Dibuix del procés de reptació. Font: Corominas i García Yagüe, 1996.

- Solifluxió (Solifluction): concepte que descriu les deformacions, a petita escala, en sòls cohesius i de poc gruix, les quals donen lloc a formes lobulars (Figura 10).

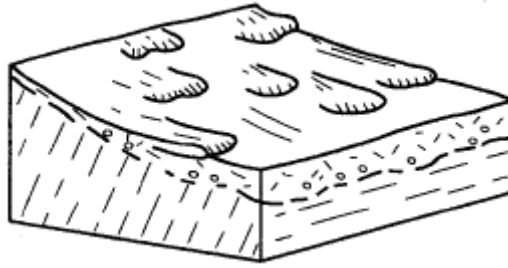


Figura 10: Dibuix del procés de solifluxió. Font: Corominas i García Yagüe, 1996.

- Cops de sorra i llim (Sand and Silt Flows): mobilització brusca de terra i llims a causa del col·lapse estructural (Garcia Yagüe y García Álvarez, 1988), (Figura 11).

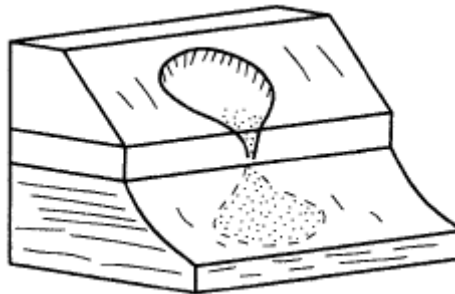


Figura 11: Representació del procés de cops de sorra i llim. Font: Corominas i García Yagüe, 1996.

- Corrent d'arrossegalls (Debris Flows): moviments ràpids de material detrític, com sorra, graves i blocs. L'elevat contingut en aigua ajuda a la baixada de la massa pels vessants, a més, la poca cohesió entre els materials fa que aquests es dipositin sense cap tipus d'estructura (Figura 12).

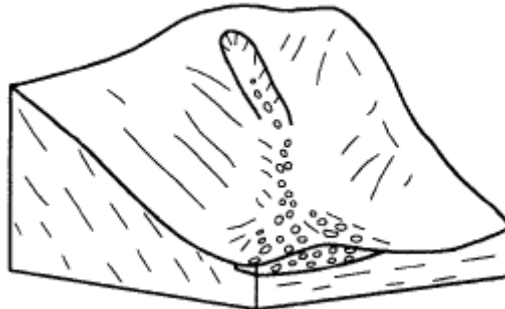


Figura 12: Representació d'un corrent d'arrossegalls. Font: Corominas i García Yagüe, 1996.

Apart de Corominas i García Yagüe (1996), nombrosos autors han donat la seva definició de corrents d'arrossegalls o *Debris Flow*. D'una banda, Varnes (1978) comenta que aquests corrents són un moviment ràpid d'un conjunt de sòlids granulars, aigua i aire, els quals es mouen com un fluid viscós. D'altra banda Johnson & Rodine (1984) van afegir que la presència de l'argila és molt més minsa. La barreja entre materials fins, grollers, aire i aigua forma una mescla fangosa que es mou a favor del pendent, formant així un con de dejecció.



Tot i així, ni la velocitat ni la concentració de sòlids són factors determinants per a detectar veritables corrents d'arrossegalls, sinó el seu comportament mecànic, ja que aquest presenta resistència a cisalla.

Els corrents d'arrossegalls poden adoptar diferents morfologies, però el més comú és que la seva longitud sigui superior al seu ample. Els moviments es poden dividir en tres parts: la zona de sortida, la zona de canal i la zona d'acumulació (Figura 13).

- Zona de sortida: és tracta d'una àrea escarpada i amb poca vegetació. Hi predominen materials detrítics o materials molt erosionats; a més, el pendent d'aquesta zona és bastant pronunciat, d'entre uns 25º a 40º.
- Zona de canal: zona intermèdia per on flueix la massa, amb un pendent pronunciada, però no tant com la de l'àrea font. El canal està limitat per dics laterals, anomenats *levees*, d'elements grollers com blocs i grava.
- Zona d'acumulació: part final de l'estructura i del moviment, en la qual el pendent ja no és tan notable i el material s'hi acaba dipositant. En aquesta zona ja no hi ha els dics laterals, per tant, la forma que adopta el material és la d'un ventall, anomenat con de dejecció. Com que la velocitat va disminuint, els materials més grollers i pesants es situen a la part principal del con, mentre que els materials més fins continuen fluint i són els que acaben donant la forma de ventall.

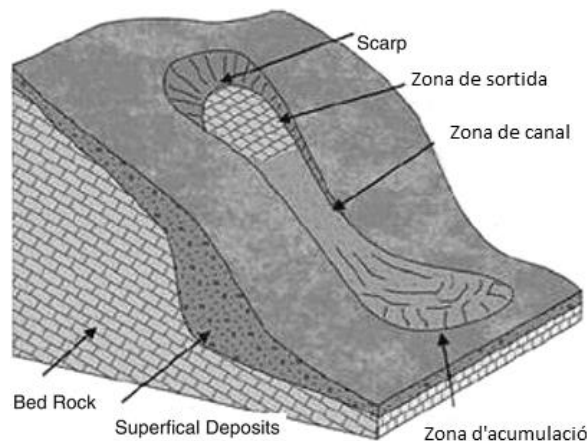


Figura 13: Dibuix on es veu les diferents parts d'un corrent d'arrossegall. Font: Prontubean

En són varis els factors que afavoreixen la formació de corrents, d'aquesta manera, les zones més susceptibles són aquelles on el material està erosionat, poc cohesionat, situat en una zona de forta pendent topogràfica i amb poca cobertura vegetal. També cal afegir, que l'aportació d'aigua per pluges intenses o per gel-desgel contribueix a un augment de la pressió d'aigua en els porus i una conseqüent pèrdua de la resistència del material.



Hi ha tres mecanismes bàsics de formació de corrents d'arrossegalls:

- Soscavació dels marges d'un barranc durant una avinguda torrencial i, a més, la incorporació de materials grollers als corrents.
- A partir d'un lliscament ja ocasionat, aquest es transforma directament en un corrent d'arrossegall.
- Trencament d'una presa natural de sediments, degut al cúmul d'aigua continguda.



### 3 DESCRIPCIÓ DE LA ZONA D'ESTUDI

D'entrada, la zona d'estudi es troba dins la regió de la Val d'Aran, una comarca de Catalunya situada al vessant septentrional de la Serralada Pirinenca. Aquest territori té una extensió de 620 km<sup>2</sup> i un 30% de la seva àrea per sobre dels 2.000 metres d'altitud. La Val d'Aran limita al nord amb França, al sud amb l'Alta Ribagorça i l'Aragó, a l'est amb el Pallars Sobirà i, a l'oest amb l'Aragó (Figura 14).

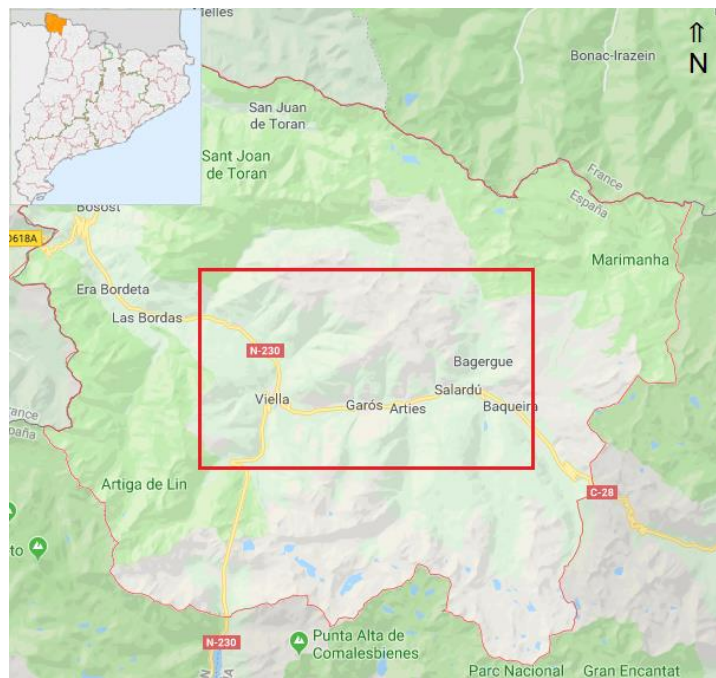


Figura 14: Mapa de la localització de la comarca de la Vall d'Aran i la zona d'estudi marcada. Font: Wikipedia

#### 3.1 Context Geogràfic

L'àrea d'estudi es situa en el curs del riu Garona. Des de Vielha e Mijaran fins a Baqueira, passant per municipis com Arties, Gessa, Salardú, entre d'altres; un tram d'uns 11 km aproximadament.

En aquest tram del territori català, el riu Garona hi té diversos afluents. D'una banda, pel marge dret hi trobem Salient i Unhòla. D'altra banda, pel marge esquerre Valarties, Aiguamòg i Ruda (Figura 15).



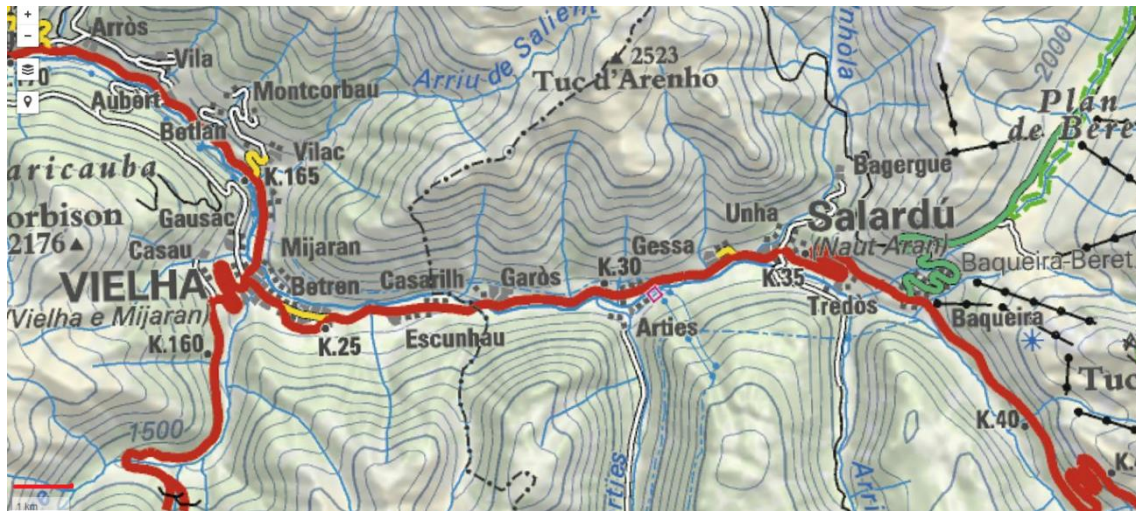


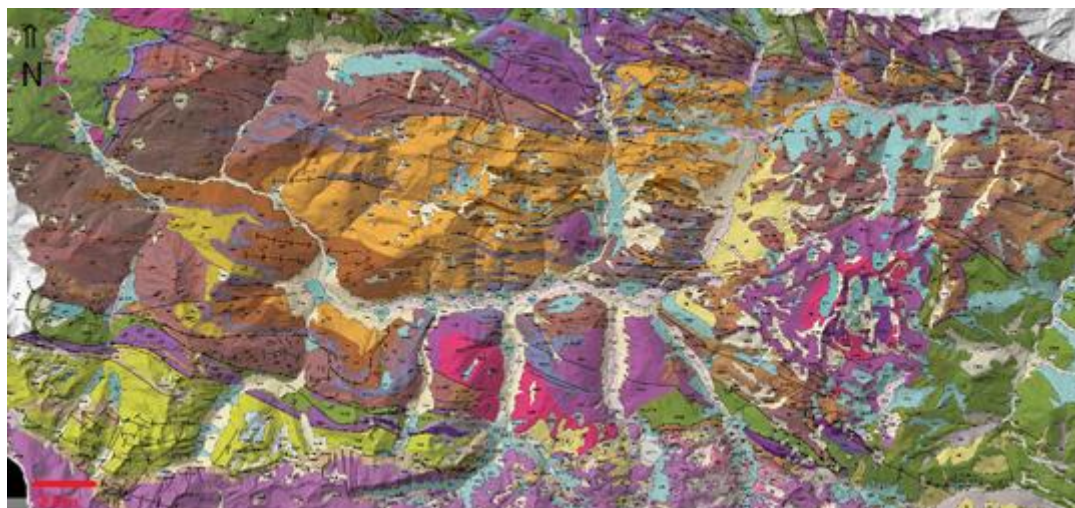
Figura 15: Context geogràfic de la zona d'estudi. Font: Google Maps

## 3.2 Context Geològic

La Val d'Aran es troba a la Zona Axial dels Pirineus, lloc on hi afloren materials paleozoics, els més antics de la serralada. Aquests roques metamòrfiques presenten una estructura i una geometria fruit del conjunt de les activitats de l'orogènia herciniana (a finals de l'era del Paleozoic) i de la deformació alpina (era del Cenozoic). Actualment, el relleu que s'observa va ser causat durant el Quaternari, a partir de la dinàmica glacial i els efectes dels cursos fluvials (Figura 16) [Boixadera, et al., 2014].

A la Val d'Aran s'hi han distingit tres dominis estructurals: dom de la Garona, Sinclinal de la Val d'Aran i l'Alta Ribagorça. La zona d'estudi està compresa dins la regió del Sinclinal de la Val d'Aran i en aquesta zona s'hi troba:

- Sinclinal de la Vall d'Aran: domini que es troba a la part central de la comarca, on hi afloren materials devonians, plegats en forma de sinclinal. Del Devonian, principalment hi ha pissarres fosques i quarzites afectades pel metamorfisme regional del Carbonífer. Altrament, també s'observa una alternança de gresos, lutites i capes calcàries del Devonian superior. A més, aquesta àrea acull el curs de la Garona, per tant, els materials descrits són els de la nostra zona d'estudi (Figura 17).



*Figura 16: Mapa geològic de la zona d'estudi, Vall d'Aran. Font: ICGC.*



*Figura 17: Aflorament de pissarres massives.*



## 4 DESCRIPCIÓ DE L'EPISODI DEL JUNY DE 2013

### 4.1 Característiques meteorològiques

#### 4.1.1 Temperatura

A principis de la primavera, els mesos de març i abril, les temperatures van ser fidels a l'època. D'altra banda, el maig i el juny van ser mesos freds, amb uns 3°C per sota de la mitjana climàtica (Figura 18). Aquesta baixada de les temperatures va provocar l'endarreriment del desgel en uns 40 dies, per tant els gruixos de neu van ser per sobre de l'habitual.

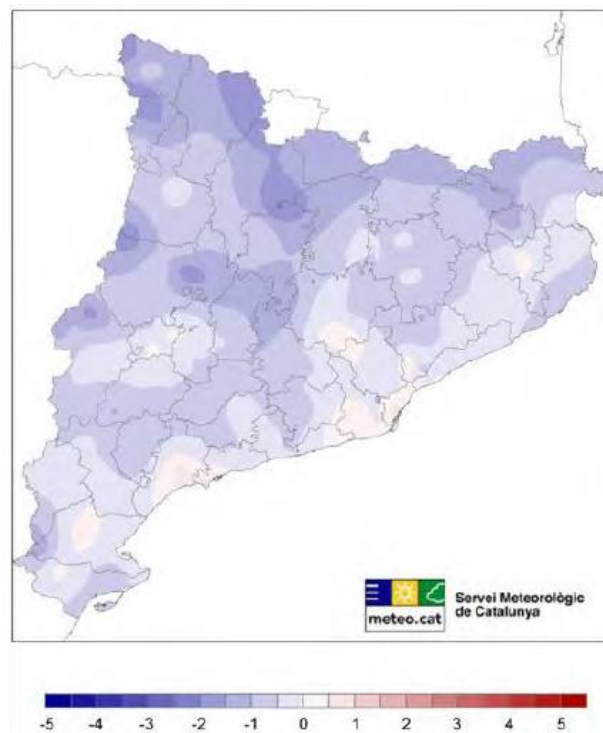


Figura 18: Diferència entre la temperatura mitjana mensual i la climàtica, a la primavera de 2013. Font: Servei Meteorològic de Catalunya.

No obstant, tot i que el mes de juny va ser especialment fred, durant els dies 17 i 18 de juny, les temperatures van pujar considerablement, fet que va comportar un increment del desgel. A la gràfica següent, Figura 19, s'aprecia la relació entre l'increment de temperatures i el desgel a l'estació del riu Garona situada a Bossòst (Val d'Aran).



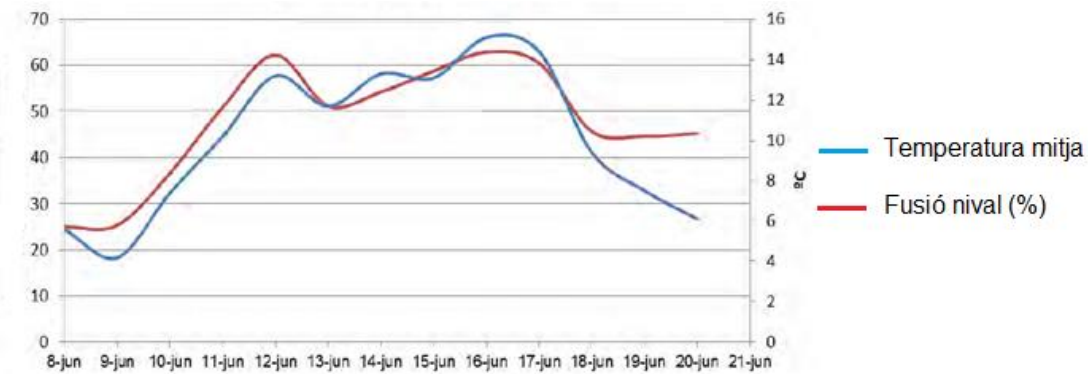


Figura 19: Gràfic que compara els valors de la fusió nival amb la temperatura mitjana al llarg del mes de juny de 2013. Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat i altres.

#### 4.1.2 Mantell nival

En primer lloc, cal ressaltar l'excepcionalitat dels gruixos de neu al mes de juny. Era un fet totalment sorprenent que a principis de juny el gruix del mantell nival fos de 300 cm, per aquest mateix motiu fins a mitjans del mes, l'ICGC encara informava del risc d'allaus, un esdeveniment que no s'havia donat mai ens els últims 25 anys.

Gràcies a les dades del gruix de neu proporcionades per les estacions nivometeorològiques situades al Pirineu de Catalunya (Figura 20), s'ha realitzat un estudi envers l'evolució del gruix de neu la Val d'Aran. Concretament a l'estació de la Bonaigua, ubicada a 2.226 metres d'altitud, en la es pot observar el creixement del gruix del mantell nival al llarg dels mesos.

Aquell any, les nevades de gener van deixar un gruix de neu a Bonaigua molt superior respecte a la mitjana (amb valors que superaven el 190% el gruix mitjà). A mitjans de juny la neu als Pirineus ja sol estar fosa, de manera que el fet de que encara hi haguessin més de 300 cm era una situació excepcional.

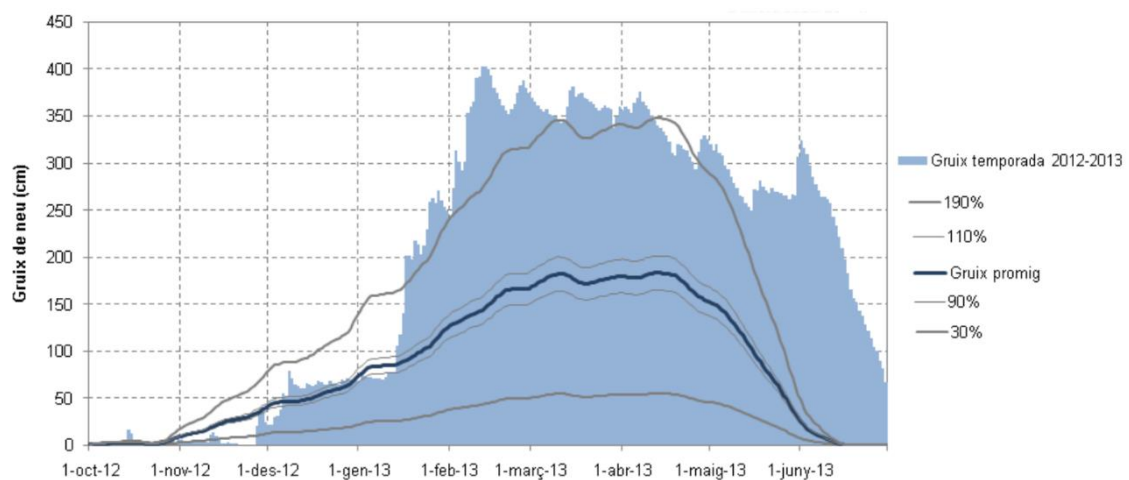


Figura 20: Gràfica que mostra el gruix de neu [cm] a l'estació de la Bonaigua (2.226 m, Val d'Aran). Font: ICGC. InfoGruixNEU

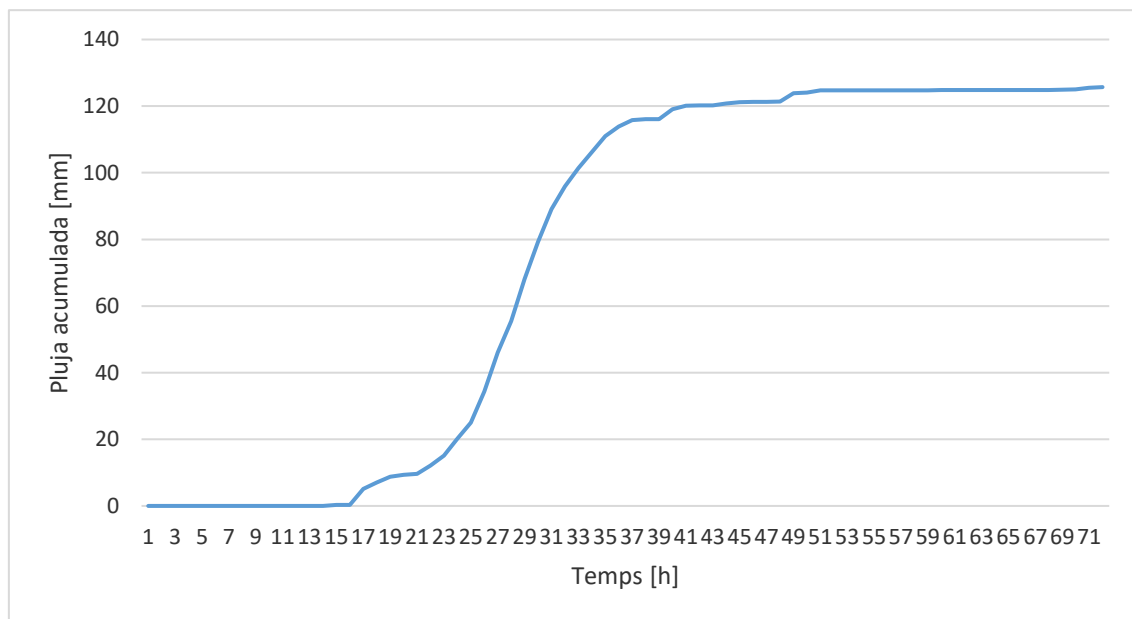


### 4.1.3 Precipitació

Pel que fa als ruixats que van caure, n'hi van haver dos d'importants: un al dia 13 de juny i l'altre entre els dies 17 i 18 de juny. Tot i així, aquest treball es centra més en el segon episodi. La Taula 1 mostra les quantitats enregistrades a les Estacions Meteorològiques Automàtiques (EMA) entre els dies 17 i 19. D'altra banda, l'hidrograma (Figura 21), ens mostra la precipitació acumulada (mm) cada hora a Vielha e Mijaran on es van superar els 120 mm en menys de 72 hores.

*Taula 1: Quantitats enregistrades a les EMA entre els dies 17 i 18 de juny. Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat i altres.*

NOM DE L'EMA	COMARCA	PPT [mm]
Vielha e Mijaran	Val d'Aran	125.7
Lac Redon (2.247 m)	Val d'Aran	61.9
Sasseuva (2.228 m)	Val d'Aran	47.2
Bonaigua (2.266 m)	Pallars Sobirà	123.8
Espot (2.519 m)	Pallars Sobirà	93.0
Certascan (2.400 m)	Pallars Sobirà	78.1
Salòria (2.451 m)	Pallars Sobirà	45.5
Boí (2.535 m)	L'Alta Ribagorça	69.0
El Pont de Suert	L'Alta Ribagorça	49.7



*Figura 21: Precipitació acumulada a l'estació meteorològica de Vielha e Mijaran (Val d'Aran). Font: ruralcat.gencat.cat.*



## 4.2 Valoració climàtica diària

El *Butlletí Climàtic Mensual*, publicat pel Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), permet el seguiment continu dels esdeveniments meteorològics principals de Catalunya. Aquest informe mensual descriu detalladament tots els episodis relacionats amb la meteorologia de Catalunya. El butlletí del juny de 2013 es centra en la regió dels Pirineus degut a les fortes pluges, les baixes temperatures i el gruix de neu que hi havia. Les dades meteorològiques referents als dies 17, 18 i 19 de juny que es presenten en aquest treball.

Entre els dies 17 i 19 de juny es va produir una situació meteorològica més complexa, ja que va ser fruit d'una depressió freda en alçada estancada sobre la península ibèrica. En aquests dies cal remarcar l'intens flux del sud a les capes mitjanes de la troposfera, la qual cosa va provocar precipitacions generoses a la Val d'Aran i zones properes; aquí la precipitació acumulada va superar els 100 mm en 24 hores, com mostren la Figura 22 i la Taula 2. A més, aquesta inestabilitat va ajudar la formació de intenses tempestes que van afectar a la resta de Catalunya.

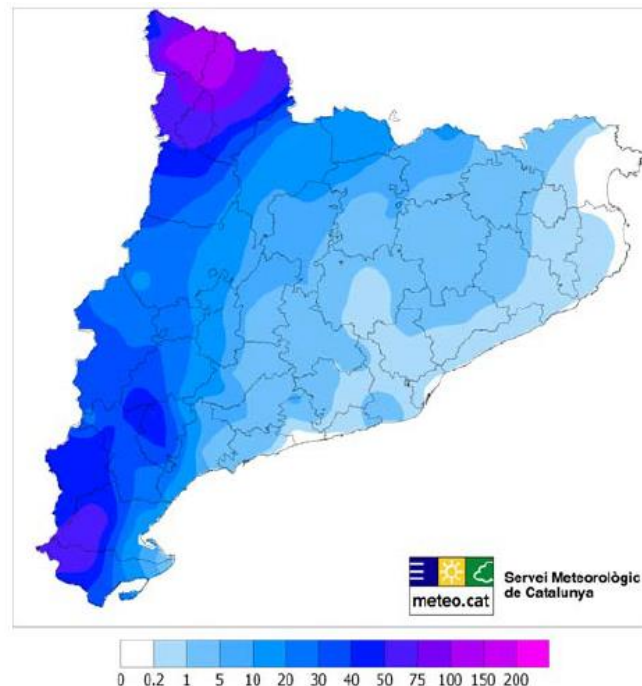


Figura 22: Distribució de la precipitació (mm) acumulada entre els dies 17 i 19 de juny. . Font: Servei Meteorològic de Catalunya.



*Taula 2: Quantitats enregistrades (precipitació, en mm) a les EMA gestionades pel SMC entre els dies 17 i 19 de juny. Font: Servei Meteorològic de Catalunya.*

NOM DE L'EMA	COMARCA	PPT [mm]
Lac Redon (2.247 m)	Val d'Aran	61.9
Certascan (2.400 m)	El Pallars Sobirà	78.1
Bonaigua (2.266 m)	El Pallars Sobirà	123.8
Espot (2.519 m)	El Pallars Sobirà	93.0
Sort	El Pallars Sobirà	44.0
Boí (2.535 m)	L'Alta Ribagorça	69.0
Vielha e Mijaran	Val d'Aran	125.7

El dia 17 de juny, les precipitacions van ser en forma de ruixat, i a partir de mitja tarda es van estendre i van anar acompanyades de tempesta i calamarsa o pedra, especialment al terç oest i a la resta de Pirineu i pre-Pirineu. Aquestes acumularen quantitats lleus.

El dia 18 de juny, es van produir precipitacions febles a la meitat oest i a mesura que va anar avançant el dia es van esdevenir intenses. Al final de la jornada, les precipitacions es van estendre a altres punts del país, acompanyades de tempesta, i calamarsa o pedra al terç oest de Catalunya. Les quantitats acumulades van ser en generals força abundants al terç oest; i molt generoses a la Val d'Aran. A la resta van ser minses. La tempesta més important va començar a afectar l'extrem sud del país cap al migdia i es va desplaçar ràpidament cap al nord, descarregant amb gran intensitat, deixant en molts casos calamarsa o pedra i fortes ratxes de vent. En tan sols tres hores va creuar la meitat occidental del país, i es va allunyant de manera cada vegada més feble pel Pirineu.

A l'albada del dia 19 es van produir precipitacions febles i disperses al nord-est del país. A partir de migdia se'n produïren en forma de ruixats i xàfecs aïllats, febles i/o moderats, de vegades amb tempesta, al Pirineu, Pre-Pirineu, al massís dels Ports.

### 4.3 Conseqüències de l'episodi

Els efectes més evidents i visibles després de l'episodi de precipitacions van ser les crescudes, les esllavissades i els processos erosius als marges dels cursos fluvials.

Les causes que van provocar aquest conjunt de sinistres en són varies. En primer lloc, les intenses precipitacions dels dies 17, 18 i 19 de juny, juntament amb les inusuals condicions climatològiques del mes de juny i un gruix del mantell nival molt superior al que correspondria. Aquestes tres condicions ja van desencadenar un conjunt de moviments gravitatoris en zones considerades com a susceptibles, degut a l'existència d'una formació superficial principalment col·luvial i producte de l'alteració del substrat rocós, a més dels elevats pendents dels vessants. En segon lloc, un aspecte clau fou la saturació dels materials superficials, degut a que l'aigua no s'infiltrava pel substrat rocós, el qual tenia una baixa capacitat de drenatge, fet que va derivar a un augment de la pressió intersticial, provocant la inestabilització dels sòls i l'aparició d'un gran nombre de surgències a cotes elevades.



Els materials que formen els principals moviments de vessant en són principalment materials quaternaris col·luvials, al·luvials o glacials; per exemple material sedimentari groller com grava o fragments de roques, a més d'argila, llims i sorra.

Cal esmentar que tots els moviments van succeir a escales molt diverses, per exemple, la presència d'allaus era molt més freqüent al Joeu i al Varradòs. Els corrents d'arrossegalls van assolir longituds des de 200 fins a 1.800 m i on més n'hi van haver va ser al llarg del curs del Valarties, a part del Joeu, Nere i Garona on també se'n van donar. Les esllavissades han abastat superfícies de 20 a 15.500 m<sup>2</sup>. Els fenòmens de dinàmica mixta presenten dimensions similars a les dels corrents d'arrossegalls, entre 300 i 1.400 m de recorregut.

Altrament, en relació amb els cons de dejecció, es va realitzar una intensa campanya per revisar la seva activitat durant els episodis de pluja. Es van analitzar 102 cons a la conca de la Garona i un d'ells va arribar a produir danys a les carreteres, el qual va tallar la carretera C-28, com mostra la Figura 23.



Figura 23: Acumulació de sediments (2.000 m<sup>3</sup>) al barranc de Salider (Vall d'Aran). Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat i altres.

L'augment del cabal de la Garona va ser tant pronunciat que ni les mesures de contenció construïdes van ser suficients per mantenir l'aigua dins el canal. A continuació s'observen els cabals enregistrats en les EMA (Taula 3).

Taula 3: Cabals enregistrats en les EMA. Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat i altres.

LOCALITAT	CABAL EN LES ESTACIONS
	[m <sup>3</sup> /s]
Bossòst	300
Aubert	245
Vielha e Mijaran	240
Artíes	170
Salardú	130





Tot i l'increment de cabal, aquest no va anar a més gràcies al bosc. La vegetació juga un paper fonamental a l'hora de mitigar el creixement del cabal, ja que té una alta capacitat de retenció d'aigua. A més, que la presència de vegetació en els vessants ajuda a reduir les probabilitats de què succeeixin esllavissades, degut a que les arrels cohesionen el sòl i les parts superiors dels arbres o plantes dissipin l'energia potencial de l'aigua de la pluja.

A causa de les crescudes del cabal, nombroses poblacions es van veure afectades. Els efectes més destacat són danys materials en edificacions pròximes als rius, inundacions en zones urbanes, danys en infraestructures i al medi natural, modificacions en els cursos dels rius i transport de materials. En són varis els exemples, la Figura 24, Figura 25 i Figura 26 mostren danys al pas dels rius per les poblacions.



*Figura 24: Edifici arrossegat pel desbordament de la Garona a Salardú (Val d'Aran). Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat i altres.*



*Figura 25: Inundació en una zona urbana. L'aigua de la Garona arriba fins a locals comercials a Vielha e Mijaran (Val d'Aran). Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat i altres.*



*Figura 26: Danys en el medi natural a causa de la crescuda de la Garona. Font: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat i altres.*

Els estudis que es van realitzar per determinar la magnitud dels danys es resumeixen en l'article *Els efectes geomorfològics de l'aiguat i riuada del 18 de juny de 2013* per Pere Oller i altres (2013), on s'explica la realització d'un estudi a escala detallada per poder obtenir informació d'especial interès.

La campanya es basava en la identificació dels efectes dels ruixats als principals cursos fluvials. A més recollia tota la informació possible sobre l'augment dels calats dels rius. Gràcies a tota la informació recollida es va poder dur a terme la cartografia dels efectes geomorfològics, que principalment es centra en els cursos fluvials de la Garona i la Noguera Pallaresa, Aiguamòg, Joeu, Valarties i Varradòs.

Resumint, en les zones estudiades s'ha pogut extreure les següents conclusions:

- Zones inundables als rius Garona i Noguera Pallaresa
- Cicatrius de socavació als rius Garona i Pallaresa i els tributaris Aiguamòg, Joeu,
- Valarties, Varradòs i Ruda.
- Superfícies erosionades als rius Garona i Noguera Pallaresa
- Moviments de vessant a la conca de la Garona.
- Activitat torrencial al cons de dejecció de la conca de la Garona.

#### **4.3.1 Cartografia dels efectes geomorfològics**

La cartografia dels efectes geomorfològics es va realitzar a les àrees en les quals es disposava d'una ortofoto prèvia al 18 de juny, i així, es va poder comparar amb les ortofotos realitzades al 22 de juny.

D'una banda, es va dur a terme la classificació dels escarpaments d'erosió en funció de l'alçada, inferior a 1 metre, entre 1 i 10 metres o superior a 10 metres d'alçada. D'altra banda, en tots el cursos dels rius s'ha cartografiat les zones erosionades per la crescuda del cabal amb l'objectiu de fer una estimació de la superfície perduda, a la Figura 27 es mostren els diferents escarpaments i les zones erosionades.

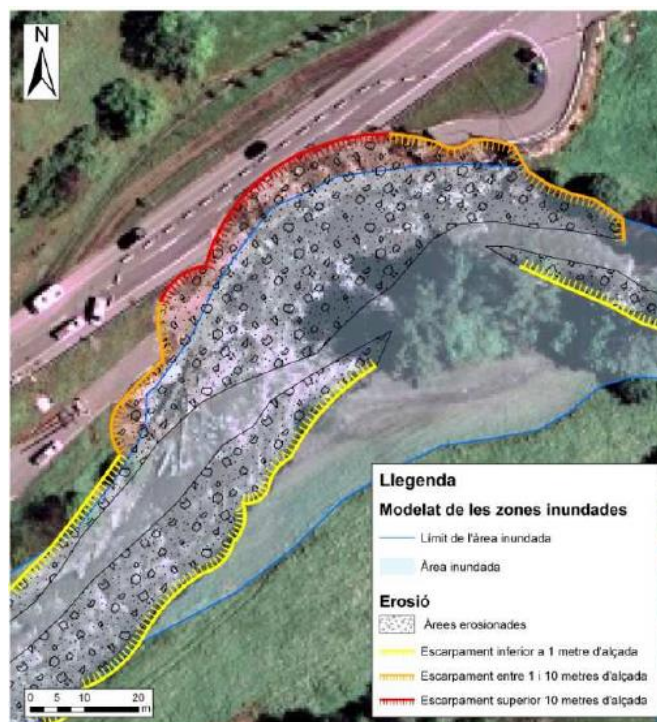


Figura 27: Crescuda del riu Garona. Part de la cartografia de l'àrea inundada, escarpaments i superfícies inundades, a Gessa (Val d'Aran). Font: Institut Geològic de Catalunya.

A la Garona, la cartografia s'ha realitzat de forma progressiva en un tram de 40 km al llarg del curs, des del seu naixement fins al barratge de Hòs, en territori francès; al riu de Ruda, en un tram de 3,8 km, des de la cota 1.530 fins la Garona; a l'Aiguamòg, en un tram de 10 km, des del peu de l'estany de Lossa fins la Garona; al Valarties, en un tram de 6 km, des del barratge de Ressèc fins la Garona; al Joeu, en un tram de 13 km, des del naixement del barranc des Pois fins la Garona; i el Varradòs, en un tram de 15 km, des del seu naixement fins la Garona.

En referència a l'àrea inundada pel riu Garona, el 90% de la superfície (194,3 ha) correspon al fons de vall, la plana d'inundació ordinària i les terrasses més baixes. A més, s'han cartografiat les socavacions produïdes al marge dret i esquerra respecte al tram total analitzat, a la Taula 4 es mostren totes les dades esquematitzades. És a dir, l'aigua va passar per unes zones inundables, les quals històricament ja havien patit episodis d'inundació degut a les intenses pluges.

Taula 4: Resultats obtinguts de l'estudi a la Garona. Font: ICGC.

GARONA	
Longitud del tram analitzat	40.246 m
Superfície inundada	2.152.900 m <sup>2</sup>
Superfície erosionada	389.165 m <sup>2</sup>
Longitud dels marges amb socavació	
Riba dreta	16.244 m (40%)
Riba esquerra	15.961 m (39.5%)





Pel que fa a la litologia dels materials afectats, el 91% (35,5 ha) de la superfície erosionada pel riu Garona correspon, a sediments al·luvials de les unitats quaternàries que conformen els materials del llit actual, la plana d'inundació ordinària i les terrasses més baixes.



## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Treball de camp

La vegetació juga un paper important en l'estabilitat dels vessants en alta muntanya [Danjon et al., 2008]. En els pendents on hi ha vegetació, majoritàriament bosc i arbusts, s'observa que el sòl està reforçat per arrels primes i gruixudes. En una zona amb vegetació abundant, la distribució de les arrels és completament heterogènia tot i que depèn de l'edat, la mida dels arbres i la distància entre ells [Danjon et al., 2008].

Les arrels destaquen per la seva rigidesa i resistència [Coder, 2010]. D'una banda, les arrels que són més primes, per tant un valor del diàmetre baix, actuen com a elements de tensió en la matriu del sòl, en canvi, les que tenen un diàmetre considerable proporcionen connexions estables entre les capes superficials del sòl i les capes subjacents [Danjon et al., 2008].

Actualment, es reconeix a la vegetació com un element clau per a l'estabilització de pendents inestables. Hi ha una clara relació entre el diàmetre de les arrels i la tensió a tracció que proporcionen, així doncs, la força a tracció incrementa com més petit sigui el diàmetre i més arrels hi hagi [Danjon et al., 2008]. La quantitat de cel·lulosa en les arrels és l'element que aporta resistència a la trencada per tracció. La cel·lulosa és una cadena de polímers, bàsicament glucosa, els quals estan units per resistents enllaços d'hidrogen [Coder, 2010].

En conclusió, la resistència a tracció disminueix en augmentar la mida de l'arrel, fet associat a la diferència en l'estructura de l'arrel en funció del seu diàmetre, ja que les arrels més petites tenen més cel·lulosa per massa [Genet et al., 2005].

Existeixen varies fórmules similars per estimar la força a tracció que realitzen les arrels, però en l'article *Using three-dimensional Plant Root Architecture in Models of Shallow-slope Stability* [Danjon et al., 2008], s'arriba a una fórmula (1) genèrica per arbres del grup de les coníferes.

$$T_s = 28.97 * D^{-0.52} \quad (1)$$

És necessari disposar del diàmetre de les arrels (D) en mil·límetres per tal de determinar la resistència a tracció (Ts) en MegaPascals.

Per dur a terme les anàlisis és necessari disposar dels valors de força a tracció de les arrels. En un primer moment, es va realitzar una cerca a fons d'aquests paràmetres en llibres teòrics de botànica i biologia de la universitat, però cap explicació semblava convincent ni adequada per a la situació.

Per aquest motiu, el 28 de novembre de 2018 es van prendre dades de les mides de les arrels més freqüents a la Val d'Aran, es va aplicar la fórmula i se'n va treure un resultat ajustat. Abans de marxar, era necessari un estudi de la zona amb més detall i concretar quina seria la millor àrea per prendre mesures. Al nord de Vielha e



Mijaran hi ha una zona molt boscosa i poc edificada. Un camí rural recorre tot el vessant de la muntanya fins a l'Estany de Vielha, així que amb una cinta mètrica es poden anar prenent mesures de les arrels que quedaven al descobert en els afloraments al llarg del camí o en el mateix sòl si l'arrel quedava quasi al descobert.

A continuació, a la Figura 28 es mostra una mapa general de la zona i marcades les parades d'on es van treure les dades.

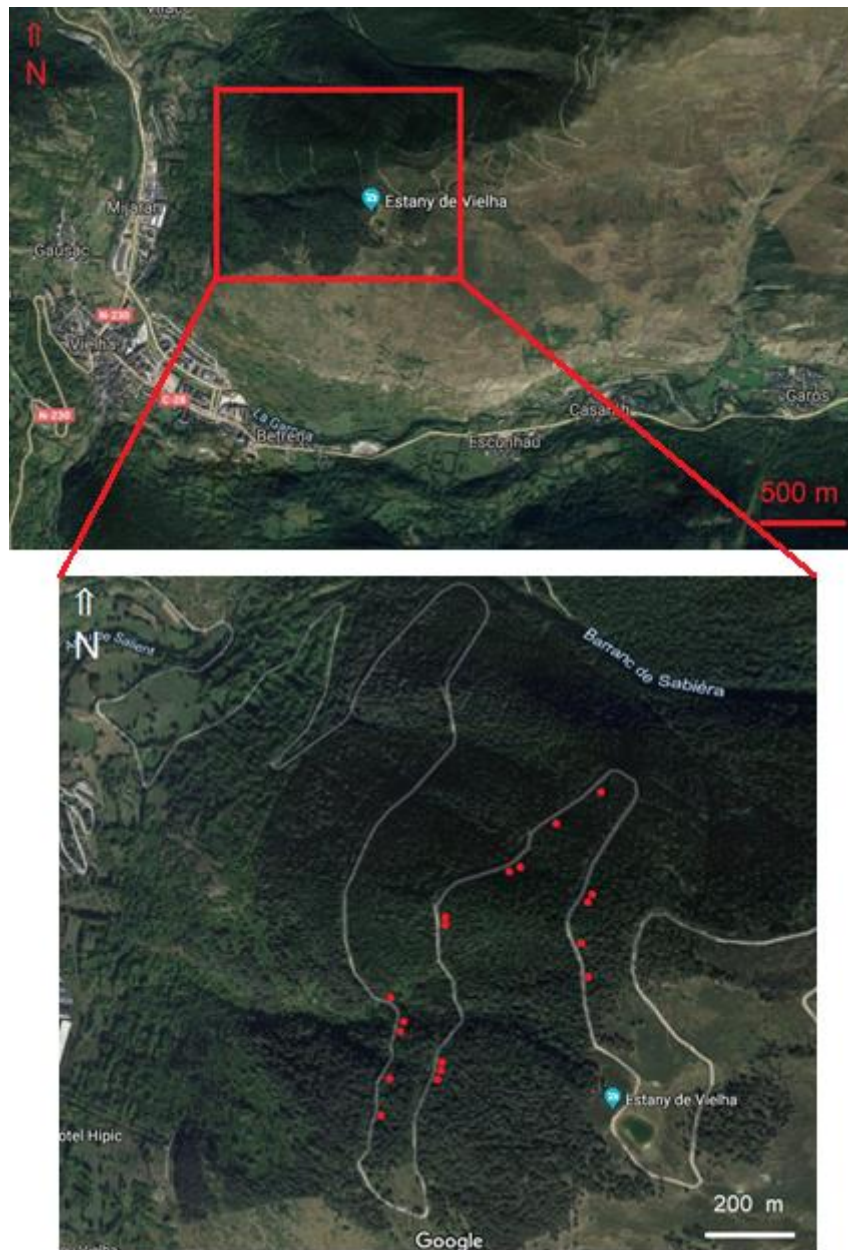


Figura 28: Mapa superior: situació general de la zona i localitzacions marcades d'on es van prendre les mesures.  
Font: GoogleMaps©



Tal com ja s'indicava en el mapa del CREAM, es va poder comprovar que realment el tipus d'arbres més abundants són: pins, avets i roures.



*Figura 29: Fotografia on es veuen les arrels dels pins en un talús vora el camí.*



*Figura 30: Fotografia on es veuen les arrels dels roures vora el camí.*



Es van prendre un total de 18 dades (veure dades a la Taula 16 a l'Annex), 6 per cada tipus d'arbre i es va procurar agafar mesures de parts diferents de l'arbre, per tal de tenir més varietat (Figura 29 i Figura 30). Si s'hagués mesurat sempre al peu del tronc, al ser l'arrel més gruixuda, doncs la resistència a tracció tindria un valor molt alt i no seria correcte. Per això hi han valors que són diferents entre ells tal i com mostra la Taula 5. Per tenir un resultat final, cal aplicar la fórmula (1) per obtenir un valor per cada tipus d'arbre i després fer la mitjana entre els tres resultats i així tenir el valor final (Taula 6).

*Taula 5: Taula amb les mesures preses en les arrels dels diferents arbres.*

PI [mm]	AVET [mm]	ROURE [mm]
65	230	190
190	70	750
130	100	100
210	160	950
180	110	130
105	135	160

*Taula 6: Força a tracció de les arrels per cada tipus d'arbre.*

MITJANA [MPa]	
PI	2.3
AVET	2.3
ROURE	1.7
<b>TOTAL</b>	<b>2.1</b>

## 5.2 Sistema d'Informació Geogràfica

Un Sistema d'Informació Geogràfica (SIG, o en anglès, GIS) és un sistema informàtic format per maquinari, programari, dades, usuaris i un marc organitzatiu que li permet registrar, emmagatzemar, gestionar, analitzar, consultar, visualitzar, presentar i difondre qualsevol tipus d'informació geoespacial [Nunes, 2013].

Els SIG és diferencien d'altres perquè permeten emmagatzemar la posició geogràfica i la forma geomètrica de les entitats i, per tant, tenen la capacitat d'interrelacionar informacions de fenòmens diferents a través de la posició i la capacitat de dur a terme operacions espacials amb les formes geomètriques de les entitats o fenòmens representats. Per aconseguir aquestes capacitats úniques dels SIG cal, per una part, la georeferenciació dels diferents conjunts de dades geoespacial, preferiblement segons un mateix sistema de referència espacial, i, per altra part, la representació espacial de la forma geomètrica de les entitats o fenòmens per mitjà de models de dades espacials adequats, com per exemple, el model de dades vectorial o el model de dades ràster [Nunes, 2013].



### 5.2.1 Aplicacions del SIG

Les aplicacions dels SIG són l'eina bàsica de gestió i tractament de la informació geoespacial. Aquestes s'utilitzen en àmbits com la gestió de recursos naturals, l'arqueologia, l'agricultura, la logística i els transports, la gestió d'infraestructures, la sanitat, el cadastre, la planificació urbana i territorial [Nunes, 2013].

El SIG ofereix un ampli ventall d'operacions pel tractament d'informació, per exemple:

- Entrada i edició de dades
- Conversió de dades
- Estructuració de dades
- Manipulació de dades
- Gestió de dades
- Visualització i consulta
- Presentació cartogràfica
- Publicació de serveis i mapes i altres geoserveis web
- Anàlisi
  - o Del terreny
  - o De xarxes

### 5.2.2 Quantum GIS

Quantum GIS (QGIS) és un SIG de codi lliure i llicenciat sota GNU – GPL (<https://www.qgis.org/es/site/>). QGIS és un projecte oficial d'Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). S'executa a Linux, Unix, Mac OSX, Windows i Android i suporta nombrosos formats i funcionalitats de dades vectorials, dades ràster i bases de dades. Per tal de poder oferir un major ús, QGIS permet l'addició d'altres programes SIG de codi obert com PostGIS, GRASS, MapServer i SAGA.

En aquest treball s'ha utilitzat el QGIS per tractar tots els mapes proporcionats per la UPC i els adquirits de fonts públics. Eines com rasteritzar, convertir o *merge* han estat clau per poder dur a terme el treball.

### 5.2.3 Ús d'ortofotos

En primer lloc, per tal de tenir una visió general dels efectes de la riuada es mostra l'ortofoto de l'ICGC, just després de la riuada i amb els moviments de massa marcats (Figura 31). Amb l'ús d'aquesta fotografia, s'ha decidit quin tram s'analitzarà, ja que tota l'àrea d'aquesta zona és massa extensa per poder-la analitzar amb STEP-TRAMM.





Figura 31: Ortofoto amb els moviments de massa marcats. Val d'Aran (juny del 2013). Escala 1:320.000.  
Font: <http://www.ortoxpres.cat/client/icc/>

### 5.3 STEP TRAMM: Soil and Terrestrial Environmental Physics Triggered Rapid Mass Movements

El model d'anàlisi STEP TRAMM és un programa creat per la *Eidgenössische Technische Hochschule Zürich* (ETH Zürich) i liderat pels investigadors Prof. Dani Or i Dr. Peter Lehmann. (<http://www.step.ethz.ch/step-tramm.html>)

El departament de recerca *Soil and Terrestrial Environmental Physics* (STEP) de la Universitat de Zürich ha desenvolupat un software en el qual introdueixes certs arxius i et representa el recorregut dels corrents d'arrossegalls poc profunds induïts per episodis de pluja.

#### 5.3.1 Descripció del model

Com ja s'ha esmentat, l'objectiu del model STEP TRAMM és centrar-se en l'anàlisi dels moviments de terra desencadenats per la pluja. És combina la idea del *Fiber Bundle Model* (FBM) amb la creació de columnes hexagonals del sòl, permetent així, una representació d'un moviment continu de massa.

##### *Què és Fiber Bundle Model?*

El concepte de *Fiber Bundle Model* (FBM) va ser introduït l'any 1926 per Pierce [Cohen et al., 2009], el qual estudiava el trencament dels fils de cotó. Basicament es tracta d'un feix de fibres paral·leles, elàstiques i fràgils, les quals tenen la mateixa longitud i rigidesa. Aquestes fibres es troben tensades entre dos punts a causa de la càrrega o la deformació que suporten.

La idea es pot adaptar al sòl, permetent així una representació de ruptures en un medi heterogeni. Hi ha varis elements en el sòl que actuen com a fibres, els quals en modifiquen la seva resistència: cimentació entre grans, capil·laritat, fricció entre partícules o les arrels de la vegetació [Cohen et al., 2009].



A STEP-TRAMM no es tenen en compte tots els paràmetres mencionats anteriorment per determinar la resistència al tall del sòl, simplement només es fa referència a la força de les arrels, la cohesió i a la matriu del sòl.

### 5.3.1.1 Landslide Triggering Model

S'anomena *Landslide Triggering Model* el model encarregat de dividir el sòl en columnes hexagonals. A més, calcula per cada columna el contingut d'aigua provinent de la pluja i el divideix entre filtració en el sòl, escolament i la filtració fins a la discontinuïtat més evident, situada entre el sòl i la roca mare.

El programa assumeix que una columna hexagonal del sòl es comporta com un gran bloc rígid i que un conjunt de forces estan a favor del moviment i unes altres s'hi oposen.

D'una banda, la força que farà moure un bloc rígid és la suma de: la component del pes (paral·lela al pendent del vessant) i la força de compressió exercida per les columnes més properes. D'altra banda, com a forces oposades al moviment hi ha la força que fan les arrels, la força de fricció i de cohesió dels materials.

Per tant, és lògic concloure que quan les forces que indueixen el moviment són superior a les que s'hi oposen, hi haurà lliscament. Aquest valor restant serà assignat a les columnes inferiors a través d'enllaços mecànics que tindran una resistència a tracció,  $\tau_t$ , definida per l'equació (2), basada en el criteri de trencament de Mohr-Coulomb:

$$\tau_t = \frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \rho_w * g * h * \chi + \frac{2 * C_s * \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} + C_r \quad (2)$$

On  $\varphi$  és l'angle de fricció interna,  $\rho_w$  la densitat de l'aigua,  $g$  la gravetat,  $C_s$  la cohesió del sòl,  $C_r$  la força de les arrels,  $h$  la pressió capil·lar,  $\chi$  la relació entre la capil·laritat i la pressió capil·lar.

Si hi hagués una càrrega que fos superior als enllaços mecànics mencionats, aleshores es donaria un trencament de les unions laterals de les columnes (Figura 32). Quan aquests enllaços laterals fallen, els quals estan vinculats a columnes superiors, aleshores, es transfereix tota aquesta càrrega a columnes inferiors. Aquesta càrrega, en forma de força de compressió, causarà que les columnes inferiors estiguin sobrecarregades i es vagin trencant, produint així lliscaments. La força de compressió,  $T_c$ , esmentada està regulada per la fórmula (3) proposada per Goodman (1980).

$$T_c = \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \rho_w * g * h * \chi + \frac{2 * C_s * \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3)$$



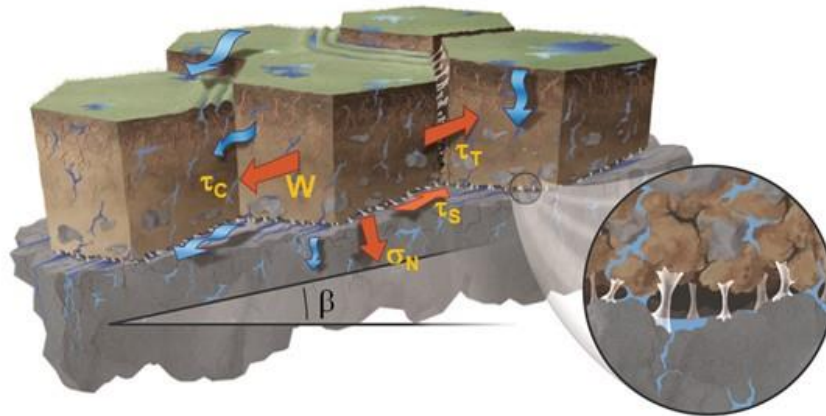


Figura 32: Representació de les columnes hexagonals i els enllaços entre elles.

### 5.3.2 Predicció dels corrents d'arrossegalls amb STEP-TRAMM

Com ja s'ha comentat, els corrents d'arrossegalls són un dels fenòmens naturals més destructius. Gràcies al *Landslide Triggering Model* es pot calcular el volum de massa involucrat i la trajectòria que seguirà. A més, per determinar la longitud del corrent d'arrossegall s'implementa l'equació (4) proposada per Rickenmann (1999), on  $V$  és el volum en  $m^3$ ,  $H$  la diferència de cotes entre el punt de sortida en metres i el final i  $L$  la distància recorreguda en metres.

$$L = 1.9 * V^{0.16} * H^{0.83} \quad (4)$$

Quan en una columna hexagonal es trenquen els enllaços que l'uneixen amb les columnes adjacents, es poden donar dues opcions:

- El pes de la columna es redistribueix entre les veïnes i aquestes l'aguanten. Per tant, s'evita un lliscament.
- El pes de la columna no es suportat per les del voltant, es dona una reacció en cadena, és a dir, un lliscament. En aquest cas, l'àrea de contribució en un punt concret seria totes les columnes fluidificades situades per sobre.

### 5.3.3 Dades d'entrada

Cal comprovar que els mapes estiguin tots georeferenciats amb el mateix sistema. En el cas de la Val d'Aran és *ETRS89/UTM zone 31N*. A més, és important que tots els arxius tinguin les mateixes dimensions, o sigui, el mateix nombre de files i columnes, mida del píxel i que coincideixin tots els límits dels mapes.

STEP-TRAMM accepta els arxius en format ASCII. Per tant, un cop es disposa de tots els arxius alineats i georeferenciats, el QGIS permet convertir el format ràster a ASCII.

Hi han dos tipus de dades d'entrada. En primer lloc, els ràsters i altres dades que determinen les característiques de la zona:



- DEM: Model Digital d'Elevacions (*Digital Elevation Map*) de la zona. En aquest treball s'utilitza un DEM proporcionat per l'ICGC. Es tracta d'un model amb una resolució espacial de 2 metres obtingut amb tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Aquest DEM en qüestió és de la Val d'Aran, te unes dimensions de 3x3 km aproximadament, l'altura màxima és de 2.749,81 metres i la mínima de 723,4 metres.
- MÀSCARA: s'utilitza per definir l'àrea d'anàlisi en el programa. El mateix STEP-TRAMM ja et permet definir-la de manera manual sobre el DEM (amb el cursor s'encercla l'àrea) o es defineix tot el DEM com àrea d'estudi. En totes les simulacions d'aquest treball, les dimensions de la màscara són iguals que les del DEM.
- MAPA DE COBERTURA VEGETAL: arxiu retallat a partir del Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya (MSCS), una cartografia temàtica d'alta resolució dels principals tipus de cobertes del sòl del país (bosc, conreus, construccions, ...). El MSCS va ser creat pel CREAf (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals), un centre públic que depèn de la Universitat Autònoma de Barcelona.

Així doncs, hi ha dos grans tipus de cobertes: les simples i les compostes (agrupacions de les simples). Les cobertes simples són: conreus, prats i herbassar, arbrat forestal, matollars, terrenys sense vegetació, cobertes artificials, cobertes humides i d'aigua. STEP-TRAMM demana un arxiu .txt amb valors de 1 en les zones on només hi ha arbrat forestal, i 0 a la resta.

- PLUJA: les dades de l'episodi de pluges s'han obtingut de RuralCat ([www.ruralcat.gencat.cat/](http://www.ruralcat.gencat.cat/)), un portal que recull informació útil pel sector agrari, rural i agroalimentari. Es poden obtenir dades de pressió, humitat, temperatura, precipitació, vent i irradiància. Aquestes dades meteorològiques són registrades cada hora i preses a les EMA del SMC. Les dades corresponen als dies 17, 18 i 19 de juny de 2013.

A STEP-TRAMM cal introduir la durada dels intervals de precipitació (en minuts) i, en un taula, anar inserint totes les intensitats enregistrades i d'aquesta manera es delimita el nombre de intervals.

- PROFUNDITAT DEL SÒL: valor que es pot introduir manualment o no. Si s'entra manualment, aleshores el gruix del sòl serà homogeni en tota la zona. No hi hauran diferències entre fons de vall o zones amb pendents pronunciats. No obstant, si es deixa que el programa calculi la profunditat del sòl, aleshores si que s'obté un mapa resultant amb un gruix variat.

Per calcular la profunditat del sòl, STEP-TRAMM es basa en el model de S.Stothoff (2008), el qual assumeix condicions d'equilibri entre els processos erosius i la taxa de producció en el sòl. Els processos que es tenen en compte en aquest model presentat per S. Stothoff (2008) són:



- Moviments en l'atmosfera
  - Transport de partícules a través dels cursos d'aigua
  - Moviments massius a causa de lliscaments o caigudes
  - Meteorització mecànica
  - Meteorització química
  - Desgast de la roca mare
- TIPUS DE SÒL: per determinar el tipus de sòl hi ha dues opcions:
- Triar el tipus de sòl a partir de la classificació que ofereix el programa
  - Descarregar els arxius del servidor *Soil Grids* ([www.soilgrids.org](http://www.soilgrids.org)), amb una resolució espacial de 250 m, els quals contenen el percentatge de massa del tipus de material indicat.

En el cas que es vulgui triar el sòl manualment, el model presenta varis tipus i diferents combinacions de sòls. D'aquesta manera, tota la zona tindrà el mateix tipus de sòl i de manera homogènia. Cada tipus te associat unes propietats hidràuliques diferents, ajustades a les seves característiques (Taula 7).

Taula 7: Propietats hidràuliques associades a cada tipus de sòl. Font: [Lehmann, P., et al 2018.]

TIPUS DE SÒL	POROSITAT	POROSITAT RESIDUAL	CONDUCTIVITAT HIDRÀULICA SATURADA [m/h]
<i>Sand</i>	0.437	0.02	0.21
<i>Loamy Sand</i>	0.437	0.035	0.0611
<i>Sandy Loam</i>	0.453	0.041	0.0259
<i>Loam</i>	0.463	0.027	0.0068
<i>Silt Loam</i>	0.501	0.015	0.0132
<i>Silt</i>	0.501	0.015	0.0132
<i>Sandy clay loam</i>	0.398	0.068	0.0043
<i>Clay loam</i>	0.464	0.075	0.0023
<i>Silty clay loam</i>	0.471	0.04	0.0015
<i>Sandy clay</i>	0.43	0.109	0.0012
<i>Silty clay</i>	0.479	0.056	0.0009
<i>Clay</i>	0.475	0.09	0.0006

- DIMENSIONS COLUMNS: creació a les columnes hexagonals del sòl, cal introduir un valor que correspon a la distància entre els centres de dos hexàgons adjacents. En tots els anàlisis aquest valor és 5 metres (valor recomanat per STEP-TRAMM).



Tot seguit, s'introdueixen una sèrie de paràmetres referents al sòl. Per realitzar un bon anàlisi de sensibilitat, els paràmetres que més influeixen en un moviment de massa són: pendent del vessant, angle de fricció interna, profunditat del nivell freàtic, la força de cohesió de les arrels, gruix del sòl i cohesió del sòl (Bregoli et al. 2015). STEP-TRAMM demana cinc paràmetres dels esmentats:

- Cohesió del sòl (*Soil Cohesion*): capacitat de mantenir les partícules del sòl unides.
- Força de les arrels (*Root Strentgh*): valor que indica la força de tensió [Pa] que fan les arrels dels arbres en el límits de les columnes del sòl creades pel programa. Aquest paràmetre està condicionat pel tipus d'espècie, l'edat i el clima local.
- Angle de fricció (*Friction Angle*): valor, la tangent del qual és el coeficient de fregament característic del sòl i relaciona la resistència al tall amb la tensió normal aplicada. Els materials detrítics, com l'argila o el llim, el valor de l'angle de fricció està al voltant dels 30 °.
- Grau de Saturació Inicial de l'aigua (*Initial Water Saturation*): relació entre el volum ocupat per l'aigua i el volum total de porus. Valor adimensional i homogeni per a tota la zona d'estudi. Calculat amb la fórmula (5):

$$S_r = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_{max} - \theta_r} \quad (5)$$

On  $\theta_w$  és el volum d'aigua per unitat del volum de sòl [ $m^3/m^3$ ],  $\theta_r$  és el contingut residual d'aigua per unitat del volum de sòl quan aquest està sotmès a altes pressions [ $m^3/m^3$ ] i  $\theta_{max}$  el volum màxim d'aigua en el sòl (sòl saturat) [ $m^3/m^3$ ]. STEP-TRAMM ja indica que per condicions àrides i seques  $S_r=0.25$  i per condicions humides  $S_r=0.50$ .

A la Taula 8 següent es mostra de forma esquemàtica tots els arxius necessaris per poder utilitzar STEP-TRAMM i les característiques d'aquests. Cal destacar, que tots els arxius són obligatoris, igual que els valors referents a les propietats del sòl. No obstant, aquests últims poden ser 0 per tal d'evitar-ne la seva contribució a l'anàlisi.



Taula 8: Tipus d'arxius, informació que contenen i font de cada input necessari.

DOCUMENTS ZONA D'ESTUDI	VALOR	TIPUS FITXER	OPCIONAL	FONT
DEM	Altituds (m)	.txt	No	<a href="http://www.icc.cat/vissir3/">http://www.icc.cat/vissir3/</a>
Pluja	Intenistat (mm/h)	.txt	Si	<a href="https://ruralcat.gencat.cat/">https://ruralcat.gencat.cat/</a>
<b>TIPUS DE SÒL</b>				
Tipus de sòl	Pes (%) Valor numèric que pot variar o no. Depèn de la font: - SoilGrids - STEP-TRAMM	.txt	No	<a href="https://www.soilgrids.org/">https://www.soilgrids.org/</a>  STEP-TRAMM
Profunditat del sòl	Valor numèric que pot variar o no. Depèn de la font: - Manual (SoilGrids) - STEP-TRAMM	.txt	No	STEP-TRAMM
<b>PROPIETATS DEL SÒL</b>				
Cohesió	0 – 5000 Pa Homogeni a tota la zona	Valor numèric	Si	STEP-TRAMM
Angle de fricció	30º Homogeni a tota la zona	Valor numèric	Si	STEP-TRAMM
Grau de Saturació de l'aigua	0 – 0.50 Homogeni a tota la zona	Valor numèric	Si	STEP-TRAMM
<b>VEGETACIÓ</b>				
Cobertura Vegetal	0/1	.txt	Si	<a href="http://www.creaf.cat/es">http://www.creaf.cat/es</a>
Root Strength	0 – 10000 Pa Homogeni a tota la zona.	Valor numèric	Si	Treball de camp

### 5.3.4 Dades de sortida

Amb tots els arxius i paràmetres entrats al programa, STEP-TRAMM ens crea varis mapes:

- Hillshade
- Cobertura vegetal (*Vegetation Map*)
- Profunditat del sòl (*Soil Depth*)
- Gràfic que mostra la relació entre la intensitat de la pluja i el volum de massa dels lliscaments (*Time series plot*)
- Mostra la probabilitat de la ruptura dels enllaços de les fibres del FBM entre columnes i entre la discontinuïtat sòl – roca mare (*FinalDamage Map*)



- Posició dels lliscaments simulats. Es pot afegir la posició dels moviments reals i així poder comparar (*Lanslide Map 2D. Landslide Inventory V.S. Simulation*)
- Ruta dels corrents d'arrossegalls (*Debris flow runout*)

## 5.4 Sector analitzat

Com ja s'ha comentat, la zona general de la Val d'Aran és massa gran per analitzar-la amb STEP-TRAMM. Per aquest motiu, s'han escollit un sector d'especial interès, una àrea al nord-est on van haver-hi nombrosos lliscaments (Figura 33).



Figura 33: Mapa de la zona general amb els lliscaments i la zona d'estudi marcats. Escala: 1:270.000. Font: <http://www.ortoxpres.cat/client/icc/>

En aquesta zona van haver-hi 88 lliscaments exactament. Aquesta àrea té unes dimensions de 3.1x2.7 km aproximadament, el punt més alt és 2.512 m i el més baix 1.427 m (Figura 34).



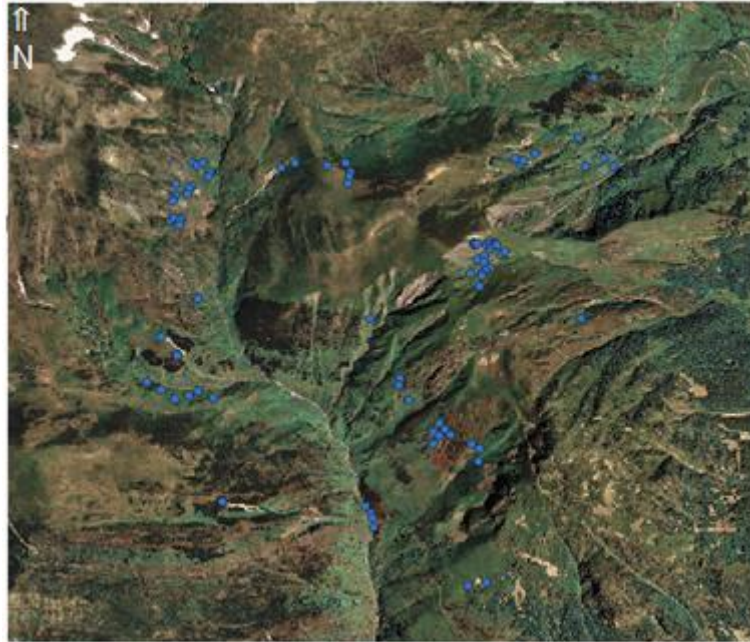


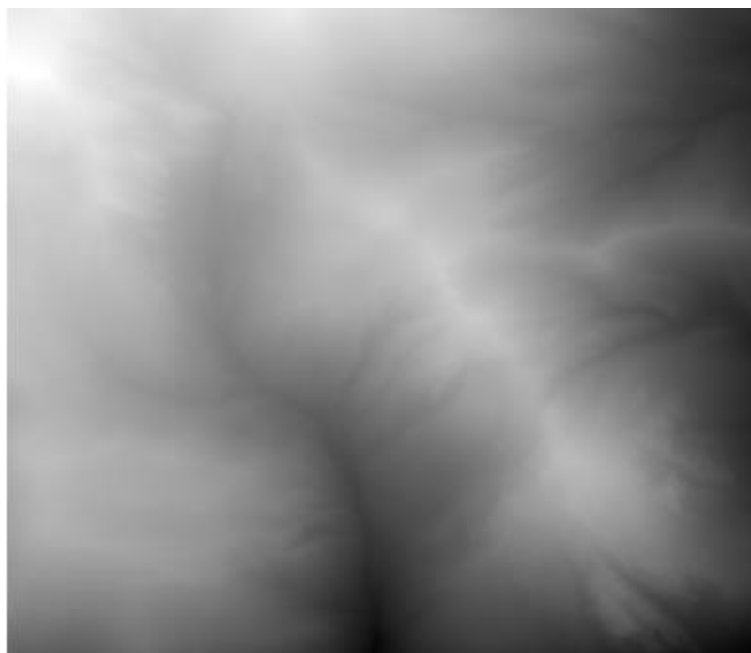
Figura 34: Zona d'estudi amb els corresponents lliscaments. Escala: 1:40.000. Font: <http://www.ortoxpres.cat/client/icc/>

Per realitzar l'anàlisi de sensibilitat s'han establert una sèrie de paràmetres fixos: els que determinen el relleu (DEM), la precipitació, la cobertura vegetal i la cohesió del sòl. En canvi, altres quatre paràmetres aniran variant en les simulacions per tal de tenir diferents resultats i poder-los comparar entre ells i amb la realitat.

### 5.4.1 Dades fixes

#### 5.4.1.1 Preparació dels ràsters DEM i cobertura vegetal

En primer lloc es retalla del DEM principal la zona a estudiar (Figura 35), es comprova que estigui projectat en el Sistema de Coordenades de Referència correcte, es rasteritza, es converteix en format .txt i ja està llest per utilitzar en STEP-TRAMM.



*Figura 35: Model Digital d'Elevacions de l'àrea d'estudi. Escala: 1:40.000. Font: UPC*

Es realitza el mateix procediment amb el mapa de de cobertura vegetal del CREAM, per tal de tenir només aquesta àrea (Figura 36).



*Figura 36: Mapa marcat amb la zona boscosa. Font: CREAM*



### 5.4.1.2 Preparació de les dades de precipitació

En quan a les dades de precipitació, es disposen de dades de les estacions de Vielha e Mijaran, del port de la Bonaigua (2.266 m), Lac Redon (2.247 m) i Sasseuva (2.228 m) del dia 18 (Taula 9).

Taula 9: Dades de precipitació acumulada del dia 18 de juny. Font: Servei Meteorològic de Catalunya.

ESTACIÓ	PRECIPITACIÓ ACUMULADA [mm]
Vielha e Mijaran	101.2
Port de la Bonaigua (2.266 m)	91.2
Lac Redon (2.247 m)	44.0
Sasseuva (2.228 m)	34.8

Aleshores, mitjançant QGIS es pot dur a terme una interpolació en la zona i crear un *Kriging* per estimar els valors de la intensitat de la pluja en la nostra àrea.

A continuació es mostra el *kriging* superposat amb el mapa topogràfic de la zona per veure la intensitat de la pluja a cada lloc. El rectangle vermell marca la zona que s'avaluarà a continuació (Figura 37).



Figura 37: Interpolació de les dades de precipitació acumulada. Escala: 1:70.000

Per obtenir les dades de precipitació, s'agafa com a model les dades recollides en l'estació del SMC de Vielha e Mijaran. Tot seguit, en el hietograma creat, s'han agrupat les dades de la precipitació en intervals de 6 hores i per tant s'obté la pluja acumulada en cada interval (Figura 38).

Les dades ens permeten veure quan va haver-hi el pic de més intensitat durant l'episodi (veure Taula 17 a l'Annex).

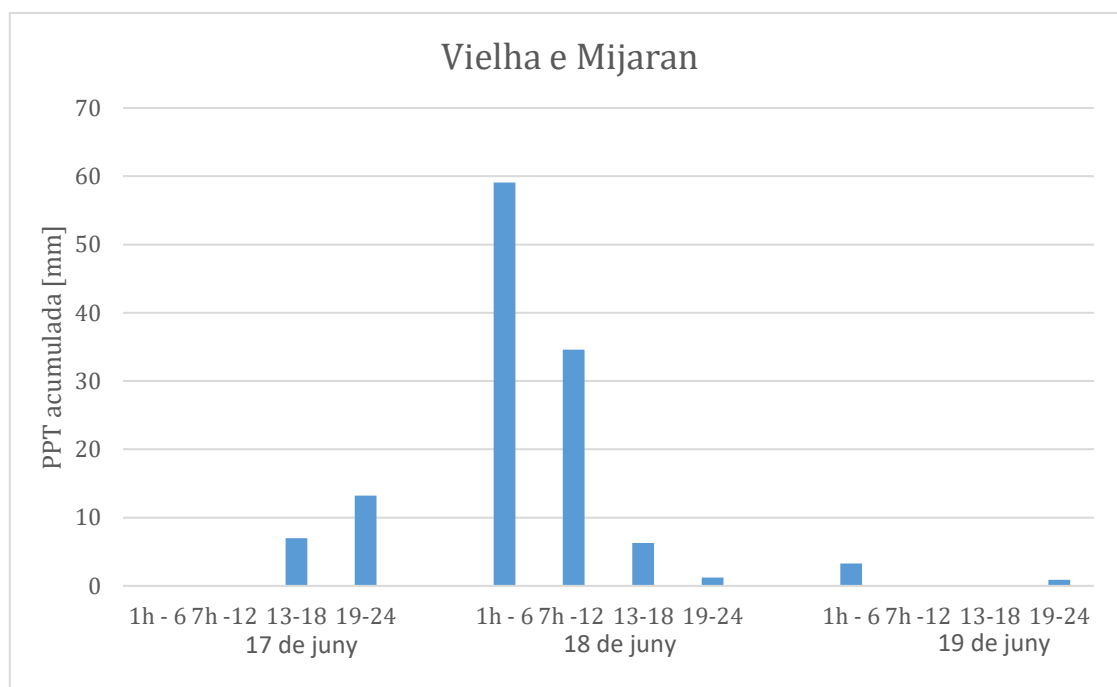


Figura 38: Hietograma de l'episodi de pluges del juny de 2013 a Vielha e Mijaran. Font: Servei Meteorològic de Catalunya.

Efectivament, les pluges van ser intenses però destaquen les del dia 18 amb un total de 101.2 mm acumulats al llarg del dia. Per tant, aquest treball només es centra en les dades de precipitació del dia 18 de juny.

Gràcies al kriging, es pot deduir el valor màxim que es va donar en la zona d'estudi en referència a la pluja acumulada.

D'aquesta manera, s'agafa el percentatge de la intensitat, de Vielha, com a referència per calcular la precipitació acumulada en la nova zona (Taula 10). Els valors obtinguts són:

Taula 10: Dades de la precipitació acumulada a Vielha i a la zona d'estudi: Font: Servei Meteorològic de Catalunya

VIELHA E MIJARAN				ZONA D'ESTUDI
DIA	HORES	PPT [mm]	%	PPT [mm]
18	1 - 6	59.1	58.4	34.6
	7 - 12	34.6	34.2	20.3
	13-18	6.3	6.2	3.7
	19-24	1.2	1.2	0.7
TOTAL		101.2	100 %	59.3



### 5.4.1.3 Altres

Els tres tipus de sòls tractats corresponen a sòls detrítics, per tant la cohesió serà semblant en tots ells. En la sorra la cohesió és nul·la i en els llims i les argiles es similar. Per tant, en les simulacions on es treballa amb llims, argila, *loam* i amb els arxius de *Soil Grids* la cohesió tindrà un valor de 1.500 Pa i en la simulació amb sorra de 0 Pa.

Un cop ja es disposa de tots els fitxers i dades necessàries per fer funcionar STEP-TRAMM es dur a terme les simulacions.

## 5.4.2 Inputs variables

### 5.4.2.1 Tipus de sòl

STEP-TRAMM permet triar diferents tipus de sòl a l'hora de realitzar una simulació. Cada sòl té unes propietats hidràuliques associades i invariables, de manera que, tota la zona d'estudi es veurà afectada per aquests paràmetres.

S'han escollit cinc tipus de sòls diferents per realitzar les simulacions: argila, llims, *loam*, sorra i una combinació de tres arxius descarregats (un per cada tipus de sòl, argila, llims i sorra) del servidor *Soil Grids*. Aquests arxius són una matriu que per cada punt de l'espai de la zona d'estudi contenen el percentatge de cada material. S'han estimat aquests valors a partir de la interpolació de dades recollides en més de 150.000 punts d'arreu del món [Hengl et al., 2017].

En la zona d'estudi els percentatges per cada tipus de sòl segons *Soil Grids* es troben entre (Taula 11):

Taula 11: Rang de percentatge dde cada tipus de sòl en la zona d'estudi. Font: *Soil Grids*

SÒL	PERCENTATGE EN MASSA
Argila	14 - 27 %
Llims	26 - 41 %
Sorra	40 - 50 %

### 5.4.2.2 Força a tracció de la vegetació

La zona boscosa es situa majoritàriament a la part est del mapa. Segons el CREAF, aquesta àrea són bàsicament arbres com pins, avets i roures. Segons el treball de camp realitzat, la força a tracció proporcionada per les arrels és de 2.1 MPa aproximadament.

STEP-TRAMM no deixa utilitzar valors superiors a 10 kPa pel que fa a la resistència a tracció. Així doncs, s'estableix 10 kPa com a valor màxim, com si fossin els 2.1 MPa trobats.



S'anirà disminuint aquest valor passant per 1.000 Pa i 100 Pa, per tal de poder veure l'efecte de la força a tracció de les arrels en el suposat cas que la vegetació disminuís o variés.

#### 5.4.2.3 Grau de saturació inicial de l'aigua

Altre paràmetre clau en els anàlisis és el grau de saturació inicial de l'aigua ( $S_r$ ). En un sòl sec tindríem un valor de 0.1 o 0.2 aproximadament i per un sòl saturat superior a 0.5.

En principi, no és tracta d'una zona amb un sòl saturat, ja que el nivell freàtic es troba a més profunditat, per tant es impensable introduir 0.5. Però sí que al centrar-nos en unes pluges molt intenses i tenint en compte el gruix de neu que ja hi havia acumulat, tampoc es lògic donar un valor que rondi el 0.2, ja que tampoc es tracta d'un sòl sec.

Tot i així, s'han fet les anàlisis corresponents amb diferents  $S_r$  per veure com podria haver estat el mapa resultant si es canviava aquest paràmetre.

#### 5.4.2.4 Gruix del sòl

Per últim, STEP-TRAMM permet introduir un valor numèric referent al gruix del sòl. La potència del sòl varia segons la zona. En les parts més properes als cursos fluvials, el gruix és més elevat degut a la sedimentació dels materials que es van dipositant, en canvi en zones d'alta muntanya aquest gruix és inferior degut a l'acció dels processos erosius.

S'han escollit tres gruixos diferents per fer anàlisis, valors semblants als que es van poder observar a la sortida de camp en algunes zones. En primer lloc un valor de 0.5 metres, després de 1 metre i per últim de 2 metres.

### 5.4.3 Cost computacional

Una de les limitacions de STEP-TRAMM és l'elevat cost computacional ja que treballa amb operacions amb matrius de dimensions molt grans que requereixen d'una gran capacitat d'emmagatzematge de dades a curt termini (RAM). A més, la velocitat de càlcul del computador és limitant pel que fa al temps de càlcul.

L'àrea d'estudi i la resolució espacial van estrictament vinculades a la demanda de memòria RAM per als càlculs. Mitjançant l'equació (6) es pot determinar la RAM requerida pel programa donada una àrea d'estudi.

$$RAM = \frac{20 * Àrea}{Resolució espacial^2} \quad (6)$$

En aquest treball s'ha utilitzat un ordinador amb una memòria de 12 GB de RAM i un procesador de 1.70 GHz. El DEM té una resolució espacial de 2x2 m i l'àrea és de 9 km<sup>2</sup> aproximadament. S'ha triat aquests dimensions perquè permeten una resolució acceptable i compleixen amb els requeriments de memòria RAM.





Les dades d'entrada també poden incrementar el temps de càlcul, com per exemple l'ús de les tres matrius diferents de *Soil Grids*. Per aquest motiu, s'utilitza com a referència del tipus de sòl el *loam*, ja que els resultats són molt similars i s'economitza considerablement el temps de càlcul, atès que es treballa amb valors numèrics extensius, és a dir un valor per a tota la zona, i no pas un valor diferent per a cada píxel.

Els intervals de precipitació també influeixen el cost computacional. Es poden introduir tants intervals com es vulgui, però cal tenir en compte que com més intervals i com més llargs, més temps de càlcul pendrà l'anàlisi. En un primer moment les anàlisis eren amb 6 intervals de 4 hores per tal d'avaluar un dia complet. Però per agilitzar les simulacions, es va decidir de fer 4 intervals de 6 hores cadascun d'ells.

Per últim, es podria no haver introduït un valor fix pel gruix del sòl i deixar que STEP-TRAMM calculés la profunditat del sòl en tota la zona d'estudi. El temps de càlcul també augmentava considerablement, però com que és un paràmetre que cal considerar, doncs es realitzen tres anàlisis amb gruixos diferents per veure com afecten les diferents profunditats.

Degut als limitats recursos computacionals per realitzar aquest treball, cada anàlisi ha pres entre 10 i 12 hores, la qual cosa impedeix fer un gran nombre d'anàlisis i per tant una comparativa exhaustiva. Així doncs, no s'ha estudiat totes les combinatòries de paràmetres possibles amb criteris d'optimització del temps.



## 6 Resultats

Encara que el model ens doni varis *outputs*, el que més interessa en aquest estudi és el *Final Damage Map*, ja que ens indica la probabilitat de trencada de les fibres que uneixen les columnes i les que connecten el sòl amb la roca mare.

Tots els *outputs* resultants s'obtenen a partir de STEP-TRAMM en un fitxer de text. Cada píxel del *Final Damage Map* té un valor numèric entre l'interval 0 - 1 que correspon a la probabilitat que hi hagi moviments de terra. Aquest fitxer és convertit en un ràster amb QGIS per tal de poder millorar-ne l'escala de colors i poder inserir l'inventari de lliscaments reals a sobre i així poder comparar la realitat amb el resultat de la simulació.

A continuació, s'ha creat amb QGIS el mapa de pendents per ajudar a situar-se i entendre el relleu de la zona. Un afluent del riu Garona travessa l'àrea fins a Gessa, el qual s'obre pas entre dues muntanyes amb pendent pronunciat, sobretot en la part sud-est del sistema (Figura 39).

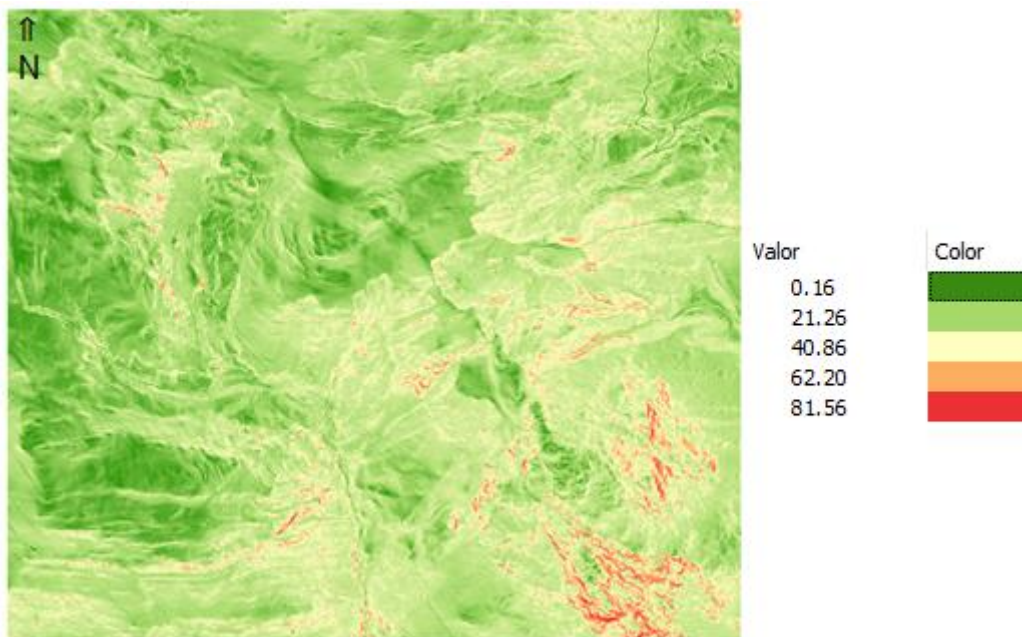


Figura 39: Mapa de pendents de la zona d'estudi. Escala: 1:30.000. Font: ICGC

Per cada anàlisi realitzada, s'ha fet el recompte dels moviments que coincideixen amb les zones de trencada estimades per STEP-TRAMM i així veure quina és el rati d'èxit del programa.



## 6.1 Influència del tipus de sòl

D'entrada es realitzen cinc anàlisis diferents per veure com afecta cada tipus de sòl. Com ja s'ha comentat, STEP-TRAMM permet triar manualment la classe de sòl, però aleshores el model considera un sol material per a tot el domini. Tot i que aquesta situació no es doni en cap zona mínimament extensa, es fa per poder veure les diferències i quin dels tipus de sòl s'ajusta més a la realitat.

Així doncs, es realitzarà una comparativa dels mapes amb diferents tipus de sòls.

Els paràmetres que s'han fixat en aquests cinc primers anàlisis són (Taula 12):

*Taula 12: Taula amb les dades dels anàlisis referents a la influència del sòl.*

INPUTS FIXOS	VALORS
Gruix del sòl	1 m
Força a tracció de la vegetació	10 kPa
Angle de fricció	30 °
Grau de Saturació Inicial de l'aigua	0.35
INPUTS VARIABLES	VALORS
Tipus de sòl	Argila/Llims/Loam/Sorra/Soil Grids

### Argila

D'entrada, el primer anàlisi realitzada és amb argila. Al tractar-se d'un sòl amb una mida de gra inferior a 2  $\mu$  i una baixa conductivitat hidràulica ens trobem davant un sòl impermeable, el qual permet que no hi hagi lliscaments ja que l'aigua està confinada en els microporus del sòl. A més, l'escolament superficial i l'erosió seran fenòmens molt presents ja que gran part de l'aigua no es filtrarà i lliscarà pendent avall. Per tant, tots els punts de l'inventari es troben en zones de no trencada, encara que el pendent o la precipitació fos considerable. A la Figura 40 es remarca l'efecte del bosc, el qual aporta més estabilitat a la zona tot i que no té un paper a destacar ja que no ha de resistir cap moviment.

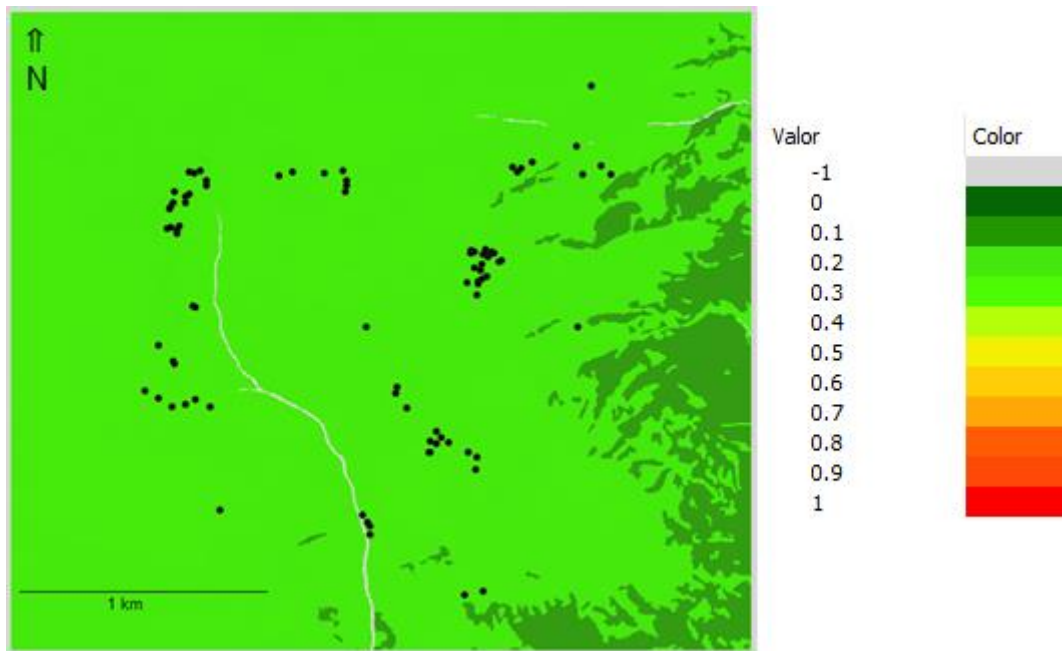


Figura 40: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnnes, en la zona d'estudi utilitzant com a sòl: argila.

### Llims

En segon lloc, el *Final Damage Map* realitzat amb llims. A la Figura 41 s'observa que el model segueix una tendència que s'intenta aproximar a la realitat però no concorda en tot. Les àrees més vermelles corresponen a les zones de més pendent i on hi han corriols per on circula l'aigua.

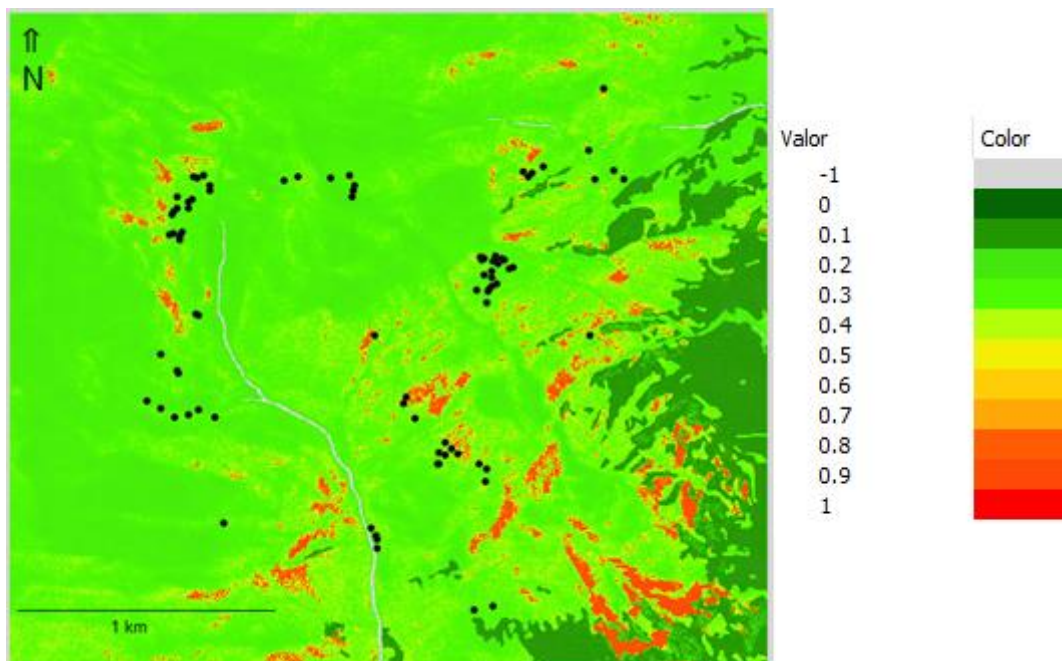


Figura 41: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnnes, en la zona d'estudi utilitzant com a sòl: llims.



### Sorra

En tercer lloc, s'ha intentat realitzar l'anàlisi a partir de sorra. S'ha canviat el valor de la cohesió per 0 Pa, ja que aquest material no presenta cohesió i per tant 1,5 kPa no és correcte. Al dur a terme la simulació, el model va aturar-se degut que el volum de lliscaments era tan gran que no podia continuar. Per tant no hi ha *Final Damage Map* resultant, però es podria deduir que practicament tota l'àrea seria vermella i per tant hi hauria moviments de terra a tota la zona.

### Loam

A continuació, la Figura 42 presenta el *Final Damage Map* realitzat amb *loam*. Aquest sòl, al ser una combinació dels tres anteriors (40 % sorra, 40 % llims i 20% argila). És el que més s'ajusta a la realitat. Tot i que no tots els lliscaments de l'inventari coincideixen amb zones vermelles, sí que és el que més s'hi aproxima.

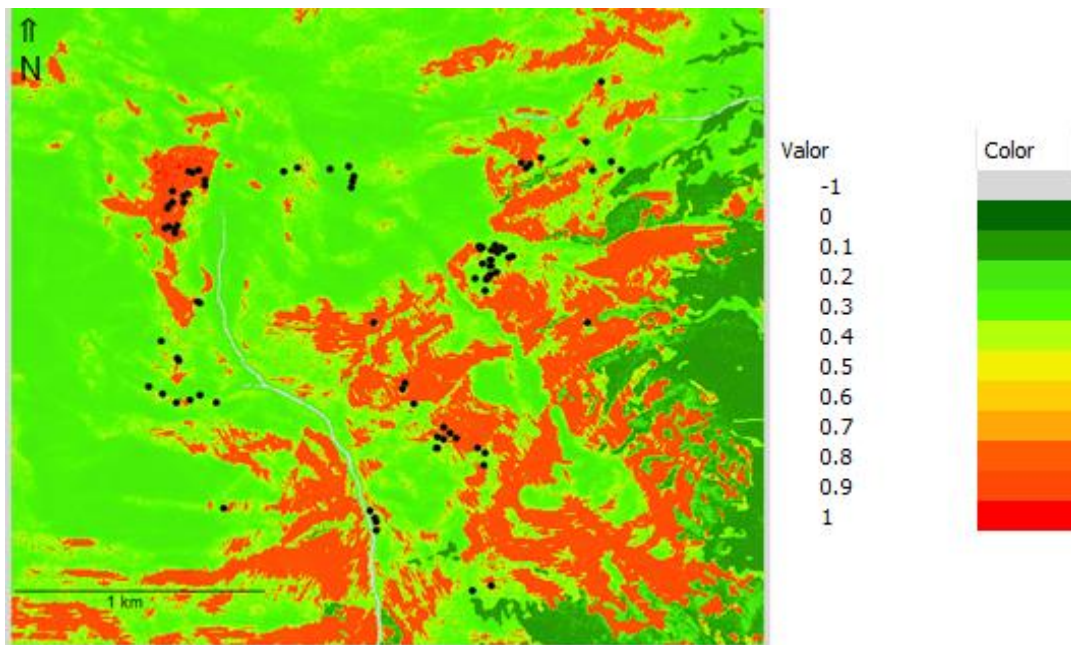


Figura 42: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com a sòl: *loam*.

### Soil Grids

Per últim, s'han descarregat del servidor *Soil Grids* els arxius corresponents al percentatge en massa de sorra, llims i argila de la zona. Com ja s'ha comentat, el model et permet introduir la distribució en l'espai de materials d'una font externa i per tant ja no tens la limitació d'un únic sòl i homogeni en tota la zona.

El *Final Damage Map* (Figura 43) obtingut a partir del tipus de sòl proporcionat per *Soil Grids* s'aproxima bastant al del *loam* sobretot, però no acaba de coincidir en algunes zones. Segueix una tendència bastant aproximada a tots els altres anàlisis, però alguns dels punts de l'inventari no coincideixen amb les zones on trenquen les fibres i hi ha moviment. És podria haver agafat els arxius de *Soil Grids* com a tipus de sòl per realitzar totes les altres anàlisis, ja que el *Final Damage Map* també s'aproxima bastant a la realitat, però l'elevat cost computacional al fer servir tres





matrius diferents per determinar el tipus de sòl fa que s'hagi optat per escollir el *loam*.

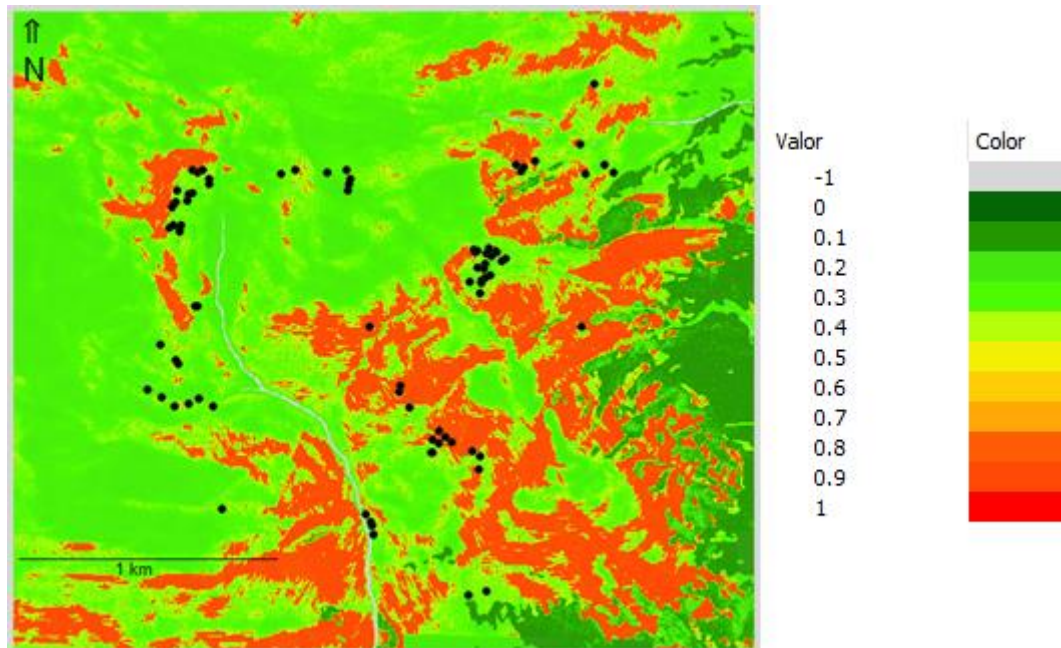


Figura 43: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com a sòl: arxius descarregats de Soil Grids.

En conclusió, el tipus de sòl fa variar de forma notable els resultats. És cert que es segueix una tendència pel que fa a les zones inclinades a tenir lliscaments. Aquests canvis són deguts a les diferents propietats hidràuliques del sòl.

En el cas dels mapes de llims, *Soil Grids* i *loam*, els tres comprenen les mateixes àrees afectades. Però la zona on trenquen les fibres en el cas dels llims és molt més reduïda que en la del *loam* o *Soil Grids*. Igual que abans, a causa de les propietats intrínseques de cada sòl, ja que aquests últims són sòls molt més permeables i permeten més la filtració de l'aigua. Al permetre's la filtració, part del sòl es fluïdifica i llisca vessant avall.

El gràfic (Figura 44) mostra el percentatge d'esllavissades registrades en cada àrea associada a una probabilitat de lliscament. Tal i com ja es veia a les imatges anteriors, els que més disten de la realitat són els d'argila i llims. En el del *Soil Grids* el del *loam* hi ha més percentatge d'esllavissades en les zones on STEP-TRAMM preveu més probabilitat de lliscament.

De tots els casos exposats, el que més s'ajusta a la realitat seria en el que s'ha utilitzat *loam*. Per tant, s'agafarà aquest tipus de sòl i les seves propietats com a model de referència.

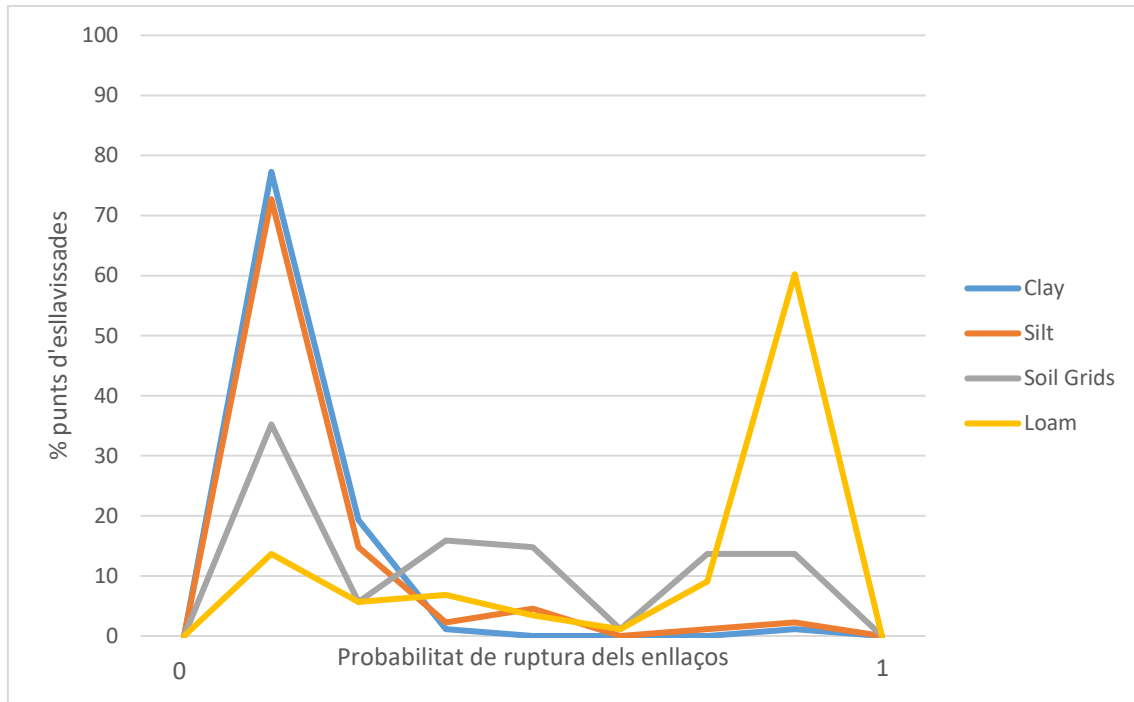


Figura 44: Gràfica que mostra la relació entre el percentatge dels punts d'esllavissades i la probabilitat de ruptura dels enllaços.

## 6.2 Influència de la força a tracció de la vegetació

El punt present tracta sobre com afecta la força a tracció de la vegetació en la zona estudiada.

Els paràmetres que s'han utilitzat en aquestes tres anàlisis es mostren a la Taula 13:

Taula 13: Taula amb les dades dels anàlisis referents a la influència de la vegetació.

INPUTS FIXOS	VALORS
Gruix del sòl	1 m
Tipus de sòl	Loam
Angle de fricció	30°
Grau de Saturació Inicial de l'aigua	0.35
INPUTS VARIABLES	VALORS
Força a tracció de la vegetació	10 kPa/1.000 Pa/100 Pa

### Força a tracció de la vegetació: 10 kPa

En la primera simulació s'observa clarament que l'efecte de la presència de vegetació s'imposa a la part est, proporcionant estabilitat al terreny encara que sigui una zona on hi han lliscaments i on el pendent és més pronunciat (Figura 45).

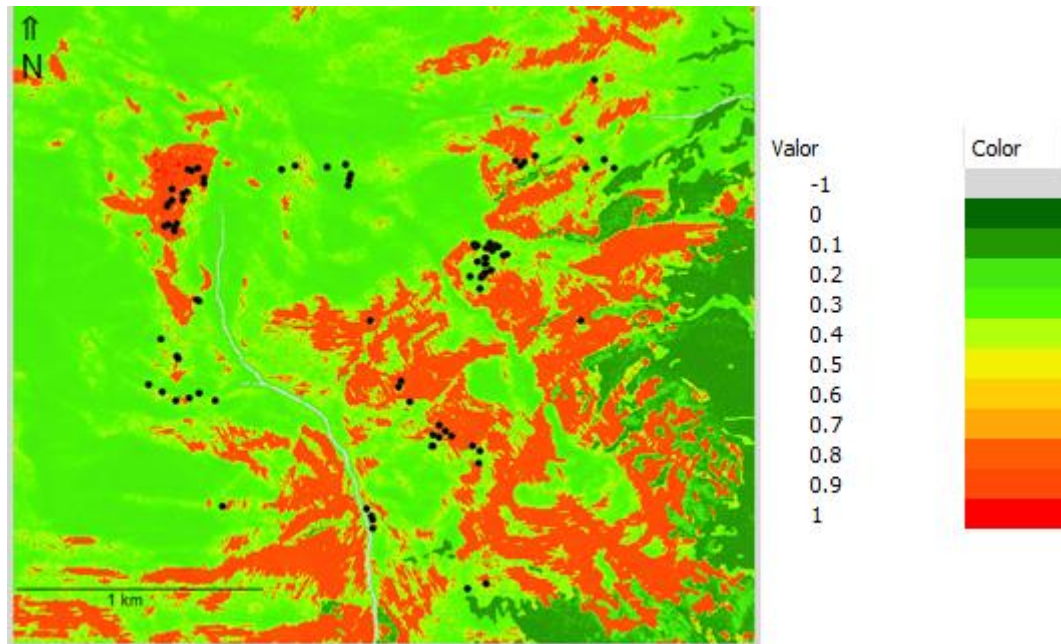


Figura 45: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor de la força a tracció de la vegetació: 10 kPa.

#### Força a tracció de la vegetació: 1.000 Pa

En segon lloc, en un futur no tan llunyà on el canvi climàtic afecti encara més a les zones muntanyoses, cada vegada la vegetació d'alta muntanya és veurà més afectada per les altes temperatures i la sequera, de manera que abundarà la vegetació propia d'ambients mediterranis. Els arbres d'alta muntanya es veuran substituïts per arbustos i arbres típics d'ambients més càlids. Per tant, la força a tracció de les arrels també canviarà, disminuirà. És a dir, no serien vàlid els 10 kPa pel que fa a la força a tracció. Caldria adaptar el valor a la suposada realitat, uns 1.000 Pa.

A la Figura 46, tot i que la zona amb vegetació encara estigui present, els moviments de massa guanyen terreny. En moltes àrees, per molt que hi hagi arbrat, quan plogui i es donin corrents d'arrossegalls la força a tracció de les arrels serà massa dèbil per impedir-los.

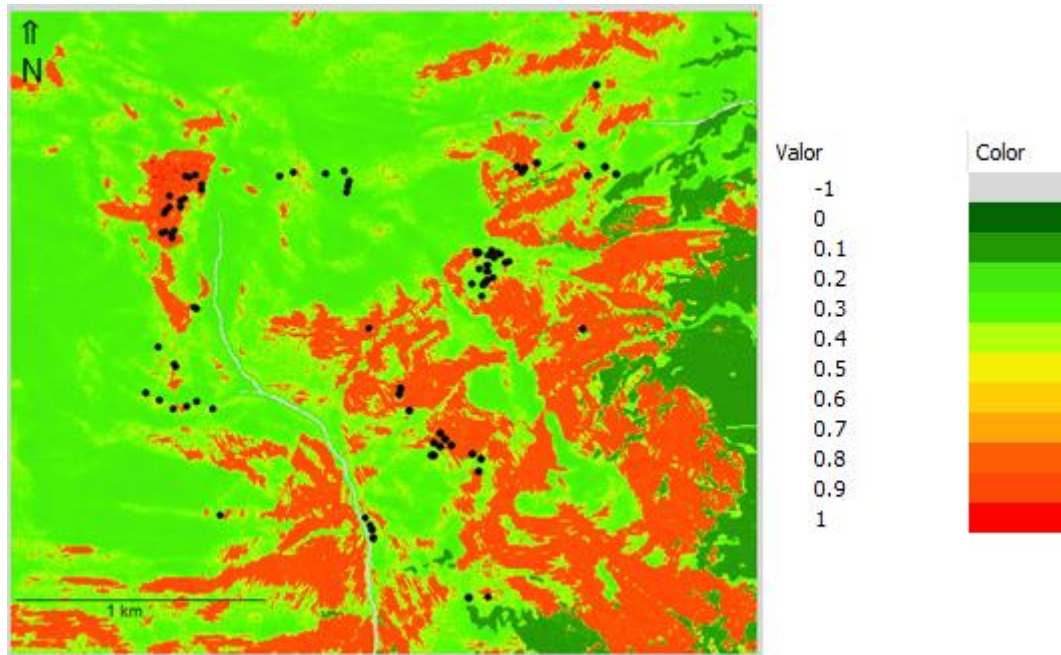


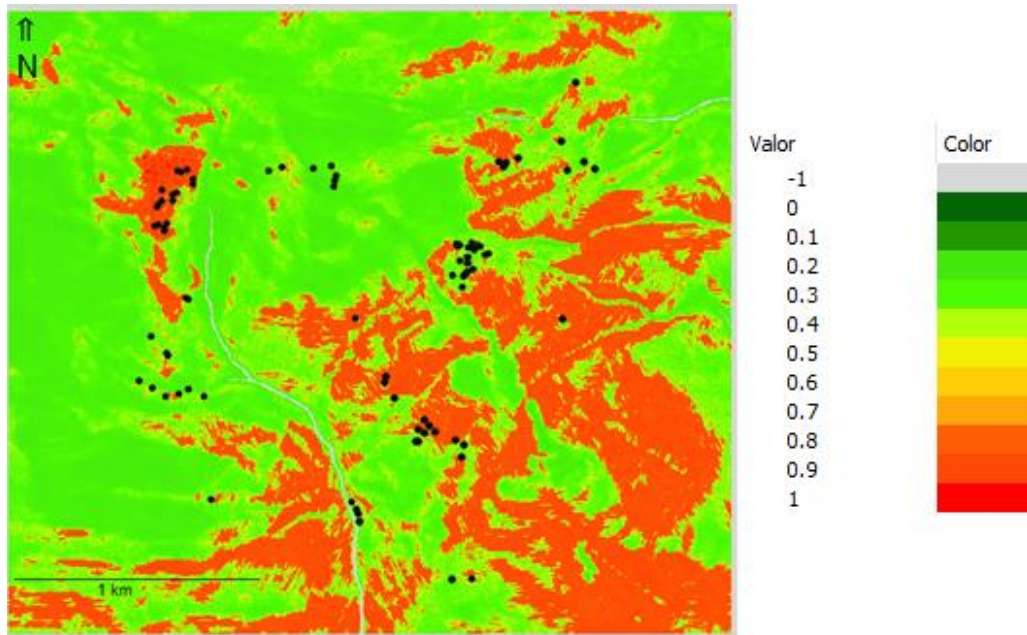
Figura 46: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor de la força a tracció de la vegetació: 1.000 Pa.

#### Força a tracció de la vegetació: 100 Pa

Per últim, en el suposat cas on la vegetació fós molt minsa, ja sigui a causa d'accions antròpiques com construccions, o el canvi climàtic, tota la zona boscosa es convertiria en una àrea susceptible a lliscaments quan és donés algun episodi de pluges intenses.

Com s'aprecia a la Figura 47, l'àrea on es veia l'efecte de la vegetació ha desaparegut. És veritat que no tota la zona s'ha reemplaçat amb moviments de massa, ja que hi ha zones que ja de per si soles no són susceptibles, però sí que on abans el bosc envaïa la zona sud-est, ara ja no en queda cap rastre.





*Figura 47: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor de la força a tracció de la vegetació: 100 Pa.*

Evidentment, la vegetació juga un paper fonamental en els vessants, ja que ajuda a mitigar els possibles efectes dels corrents d'arrossegalls. En una zona propensa a moviments on hi acostumava a haver vegetació i posteriorment aquesta ha desaparegut, comportarà un augment de risc per poblacions properes. Per tant, és important la conservació de boscos en zones de molt pendent ja que ajuden a mitigar els efectes dels riscos geològics.

Respecte els resultats obtinguts, les zones susceptibles a lliscaments on no hi ha bosc, són constants en els tres mapes resultants. No obstant, en la zona est sí que es nota que com menys força a tracció hi ha per part de les arrels, més probabilitat hi ha de lliscaments.

La Figura 48 mostra el percentatge d'esllavissades registrades en cada àrea associada a una probabilitat de lliscament. Tal i com ja es veia als resultats anteriors, només es veuen canvis en la zona boscosa. Com que no es va donar cap moviment de massa relativament a prop de la vegetació, doncs el valor de la probabilitat de lliscaments en cada punt serà similar, només es veurà canvis en aquelles zones properes o en la pròpia vegetació.



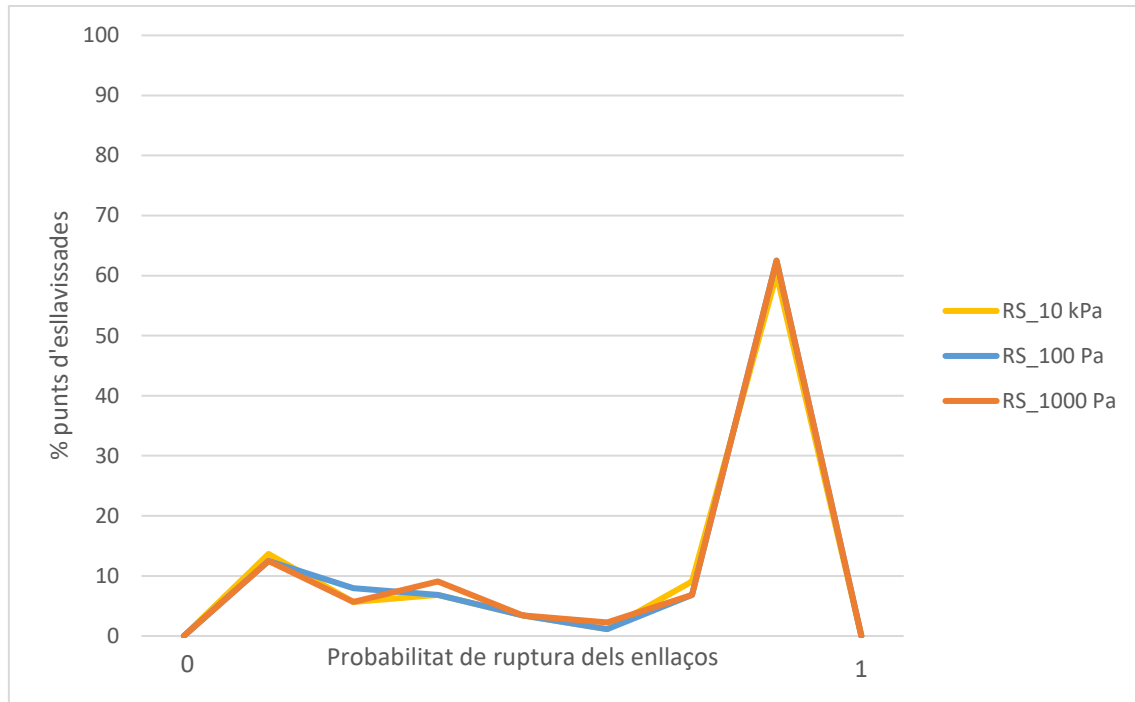


Figura 48: Gràfica que mostra la relació entre el percentatge dels punts d'esllavissades i la probabilitat de ruptura dels enllaços.

### 6.3 Influència del grau de saturació inicial de l'aigua

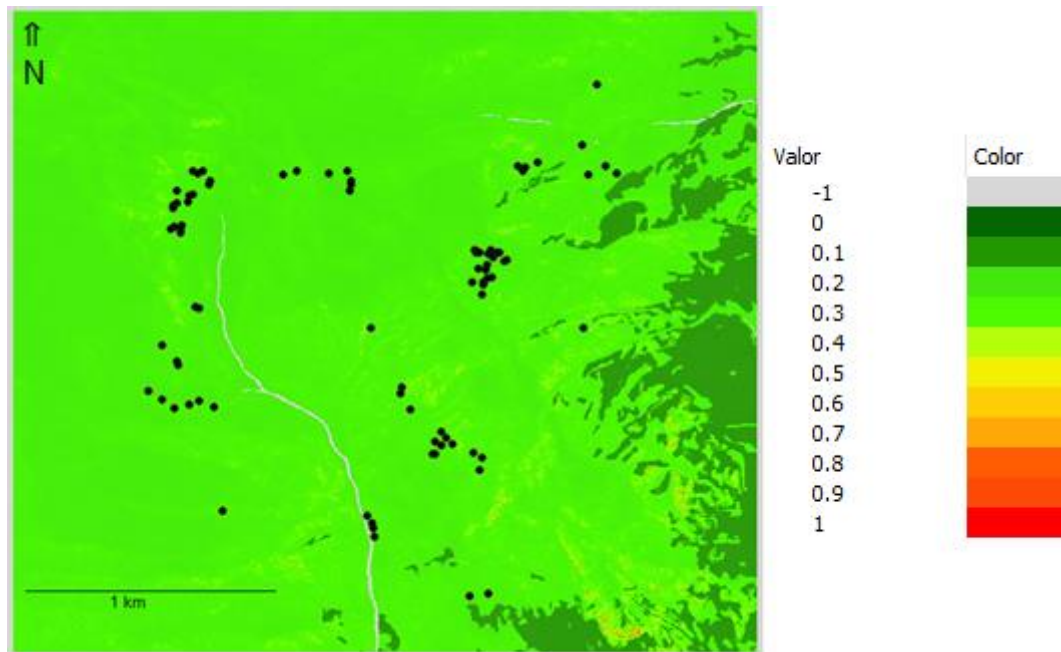
Per analitzar com influencia el grau de saturació inicial de l'aigua s'han fixat els paràmetres següents (Taula 14):

Taula 14: Taula amb les dades dels anàlisis referents a la influència del grau de saturació inicial de l'aigua.

INPUTS FIXOS	VALORS
Gruix del sòl	1 m
Tipus de sòl	Loam
Angle de fricció	30°
Força a tracció de la vegetació	10 kPa
INPUTS VARIABLES	VALORS
Grau de saturació inicial de l'aigua	0.15/0.35/0.50

#### Grau de saturació inicial de l'aigua: 0.15

En primer lloc, suposem que tenim un sòl sec abans de les pluges. Seria una situació on no hi hagués neu i el nivell freàtic, evidentment, estaria per sota la capa de sòl superficial, per tant  $S_r=0.15$ . Després de les pluges del dia 18, les quals no afecten massa a l'àrea d'estudi, perquè només s'aprecien uns lleus lliscaments a la zona sud-est, la qual coincideix amb la zona de més pendent (Figura 49). Tot i així, és un resultat que no s'ajusta gens a la realitat, ja que com s'ha comentat, el sòl no estava sec.



*Figura 49: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor del grau de saturació inicial de l'aigua: 0.15.*

#### Grau de saturació inicial de l'aigua: 0.35

En segon lloc, 0.35 ha estat el valor que més s'ha ajustat a la realitat. El sòl ja tenia cert volum d'aigua acumulada dins els porus, degut a la neu i les pluges que van haver-hi dies abans. Molts dels lliscaments de l'inventari coincideixen amb les zones susceptibles (Figura 50), de manera que un valor que ronda el 0.35 és l'adequat.

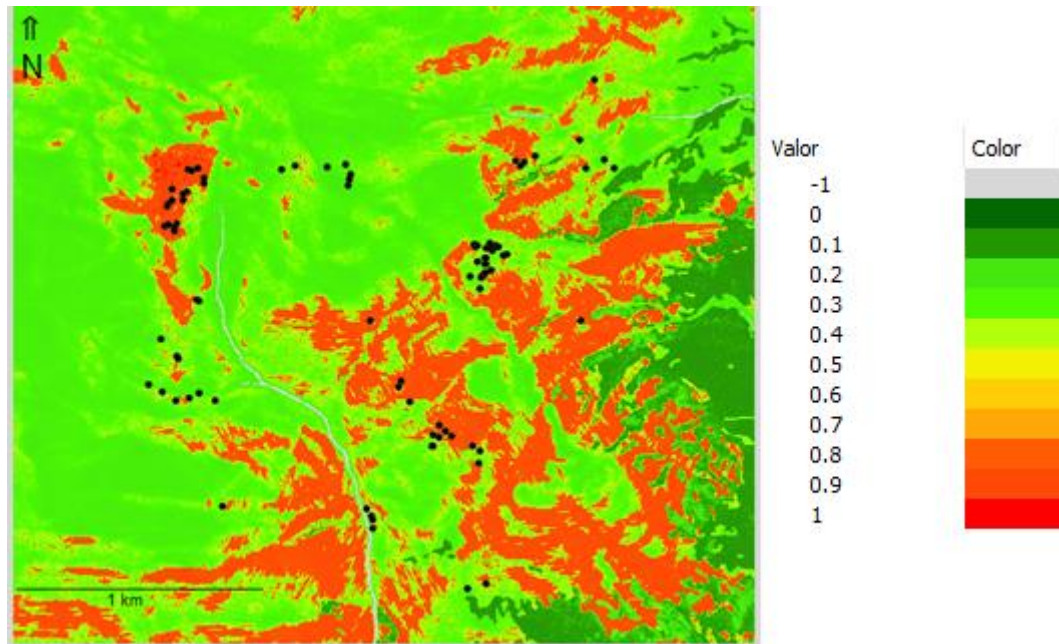


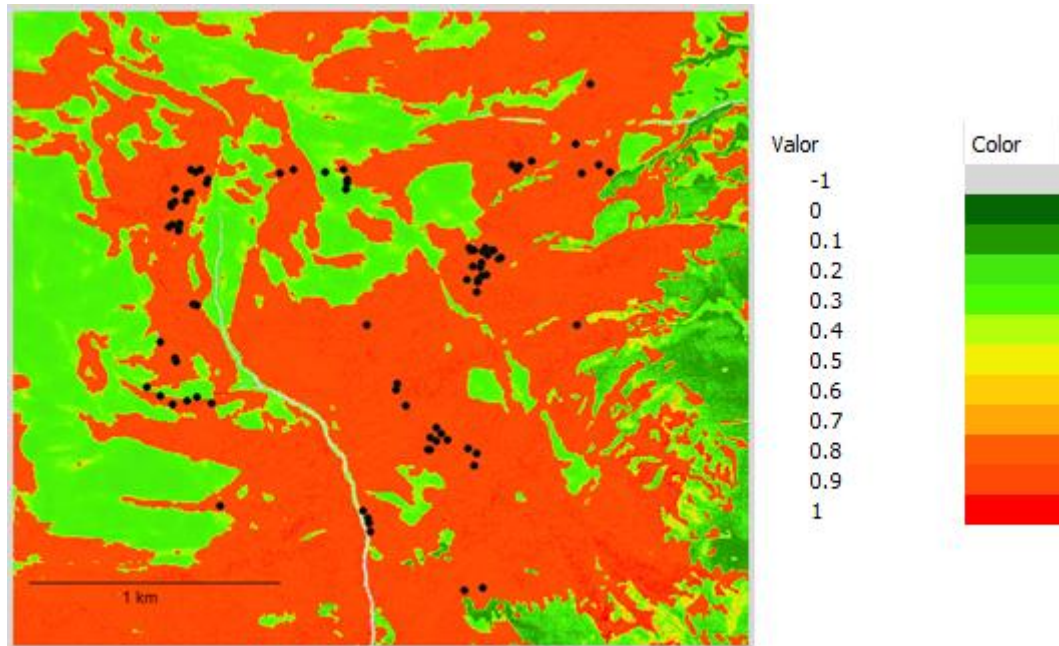
Figura 50: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor del grau de saturació inicial de l'aigua: 0.35.

#### Grau de saturació inicial de l'aigua: 0.5

Per últim, en aquest cas el grau de saturació inicial de l'aigua és 0.5 (Figura 51). De manera que, moments previs a les pluges ja hi havia aigua en els porus del sòl, possiblement a causa de la neu i de les pluges anteriors. Si a aquesta quantitat d'aigua de l'interior del sòl se li afegeixen les grans quantitats d'aigua que van caure, doncs aleshores s'obtindrà un mapa on predominin les zones de trencada.

De tots els mapes obtinguts, aquest és el que més àrea de ruptura conté. Fins i tot, la zona boscosa no és tan estable com en altres anàlisis, per tant la força a tracció del bosc no podria resistir tan bé els efectes adversaris dels corrents d'arrossegalls.

El *Final Damage Map* seria més acura si les zones de trencada coincidissin exclusivament amb les posicions reals dels lliscaments. No és el cas, ja que segons el model casi tota l'àrea és fluïdificaria i lliscaria vessant avall.



*Figura 51: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor del grau de saturació inicial de l'aigua: 0.50.*

El grau de saturació inicial va estrictament vinculat a l'espai porós del sòl. D'aquesta manera, la mida de gra també hi juga un paper fonamental. En aquests casos, el *loam* té un valor de la porositat mig i una porositat residual baixa. Per tant, es pot considerar un sòl permeable on l'aigua s'hi podrà filtrar. Evidentment, tot dependrà de les proporcions de cada material, però normalment la fracció d'argila és menor que les altres, és a dir, el sòl no serà tan impermeable.

La Figura 52 mostra el percentatge d'esllavissades registrades en cada àrea associada a una probabilitat de lliscament. Segons els resultats anteriors, amb un  $S_r=0.15$  la probabilitat de lliscament és baixa segons STEP-TRAMM per cada punt de l'inventari. Amb un valor de  $S_r=0.35$ , els resultats s'ajusten més a la realitat, ja que un elevat percentatge de punts d'esllavissades reals tenen un alt valor de probabilitat de trencada. Finalment, amb  $S_r=0.50$  s'obté el gràfic ideal, però el Final Damage Map obtingut no és acurat.

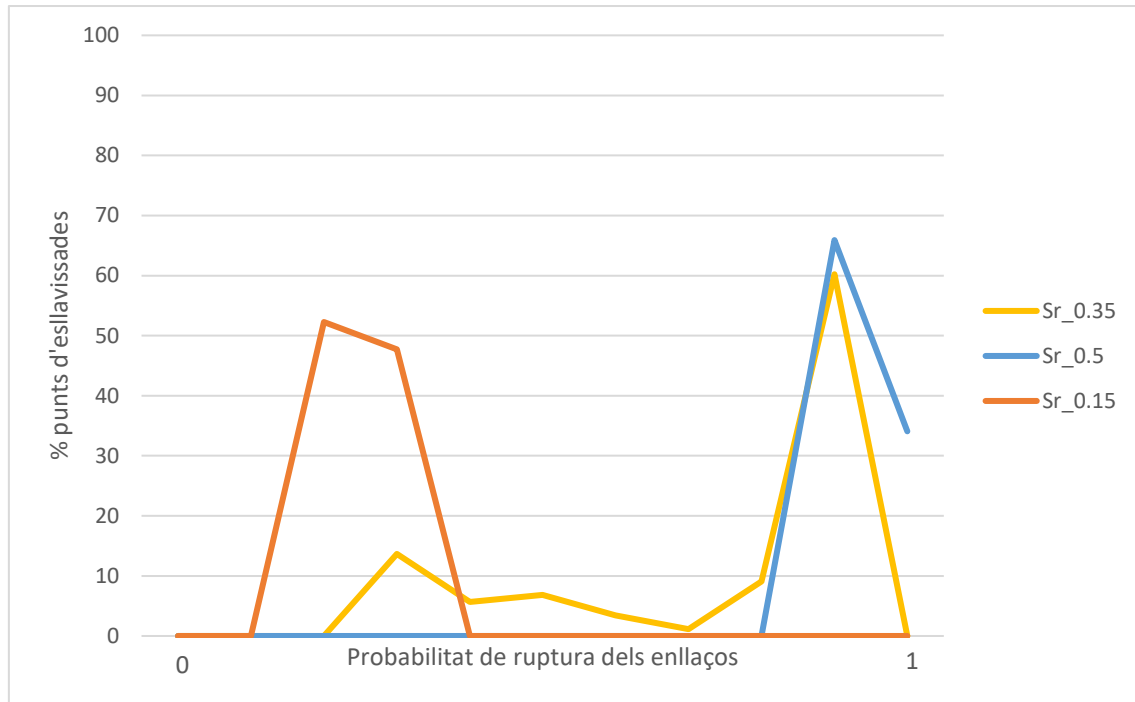


Figura 52: Gràfica que mostra la relació entre el percentatge d'esllavissades i la probabilitat de ruptura dels enllaços.

## 6.4 Influència del gruix del sòl

El gruix de sòl afectarà considerablement a la quantitat d'enllaços que es trencaran degut a la pluja. S'han realitzat tres simulacions diferents fixant els següents paràmetres (Taula 15):

Taula 15: Taula amb les dades dels anàlisis referents a la influència del gruix del sòl

INPUTS FIXOS	VALORS
Grau de saturació snicial de l'aigua	0.15/0.35/0.50
Tipus de sòl	Loam
Angle de fricció	30 °
Força a tracció de la vegetació	10 kPa
INPUTS VARIABLES	VALORS
Gruix del sòl	0.5/1/2 m

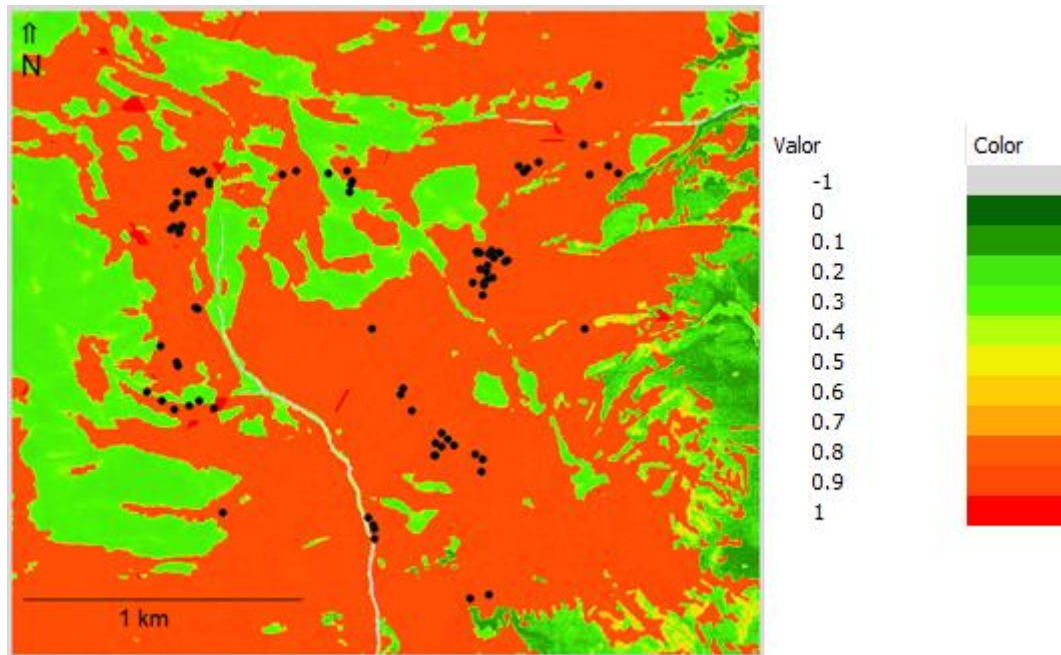
### Gruix del sòl: 0.5 m

En primer lloc s'ha realitzat una anàlisi amb la profunditat del sòl de 0.5 metres. Tal i com s'observa a la Figura 53 gran part de l'àrea d'estudi es fluidificaria amb aquest guix. L'aigua es filtraria al sòl, de manera que augmentaria el pes de les columnes i els enllaços que les connecten no aguantarien aquest augment de càrrega. Començaria a haver-hi ruptures d'enllaços en columnes i el pes d'aquestes es repartiria en columnes inferiors, les quals no aguantarien la sobrecàrrega i anirien propagant la ruptura.





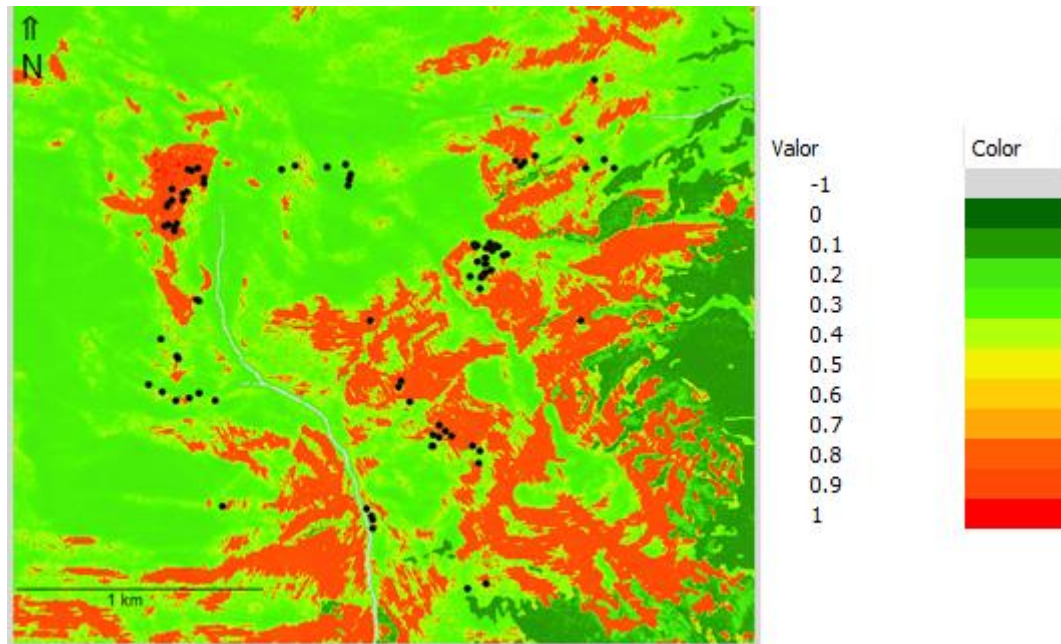
A més, la càrrega acumulada en les esllavissades és considerable ja que inclús la força a tracció de les arrels perd eficiència. La baixa probabilitat de trencada que solia haver-hi en la part boscosa augmenta, és a dir, és més probable que la vegetació no pogui mitigar els lliscaments.



*Figura 53: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor gruix del sòl: 0.50 m.*

#### Gruix del sòl: 1 m

En segon lloc, el gruix que s'ha utilitzat és més coherent i el que més s'ajusta a les observacions fetes a camp, 1 metre. El valor ha de ser superior a 0.5 metres, però tampoc molt més ja que com major sigui menys probabilitats hi ha de ruptura dels enllaços. Per tant, s'ha escollit un valor mitjà que permeti que les zones de ruptura coincideixin amb les posicions dels moviments de massa a la realitat (Figura 54).



*Figura 54: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor gruix del sòl: 1 m.*

#### Gruix del sòl: 2 m

Per últim, el gruix de la capa superficial és de 2 m. Com major és el gruix, major és la quantitat de sòl afectat per l'aigua filtrada, però també més resistència ofereixen les columnes del sòl. Per tant, s'iniciaran ruptures dels enllaços en les zones més conflictives, però aquests moviments en cadena no aniran a més degut a la força de les columnes inferiors ja que aguantaran la càrrega de les columnes que han fallat (Figura 55).

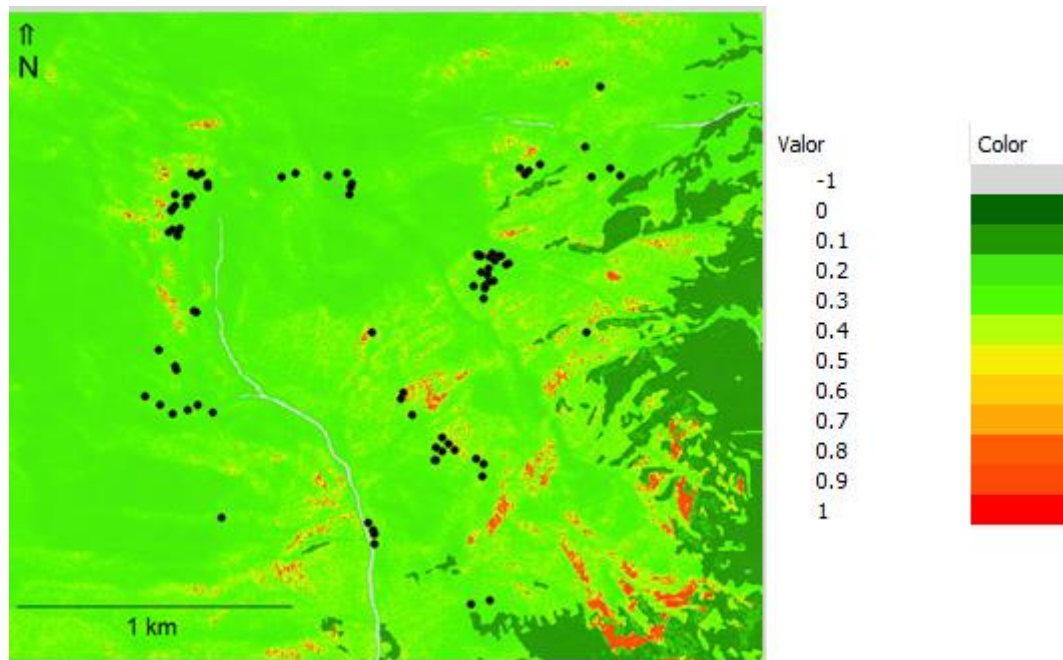


Figura 55: Probabilitat de ruptura dels enllaços, que uneixen les columnes, en la zona d'estudi utilitzant com valor gruix del sòl: 2 m.

Segons les simulacions realitzades, a mesura que augmenta el gruix del sòl, disminueix la probabilitat de ruptura dels enllaços. La Figura 56 mostra el percentatge d'esllavissades registrades en cada àrea associada a una probabilitat de lliscament. S'observa en la Figura 56 que per valors baixos de la profunditat del sòl s'obté una gràfica més acurada, però a l'hora més diferent a la realitat. En canvi, a l'augmentar el gruix del sòl, la gràfica resultant no és gens la desitjada però el *Final Damage Map* és més precís.

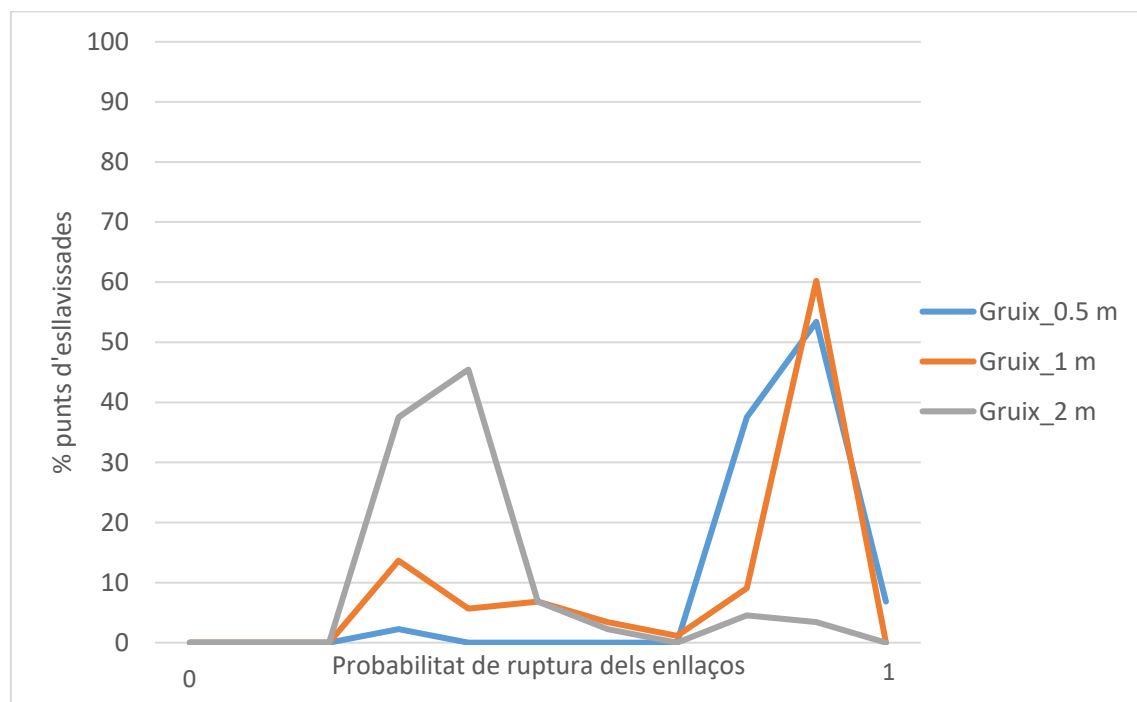


Figura 56: Gràfica que mostra la relació entre el percentatge d'esllavissades i la probabilitat de ruptura dels enllaços.



## 7 Conclusions

En resum, el model és una bona eina per fer simulacions de moviments de masses un cop ja es té les dades. Tot i així, el model té algunes limitacions i paràmetres que no es tenen en comte i que són molt determinants perquè es donin lliscaments. Per exemple, el gruix nival, la vegetació que no és bosc (prats, conreus, herbassar) o la presència d'un curs fluvial a la zona. A més, els paràmetres intrínsecs de cada sòl estan establerts segons un criteri que potser no s'ajusta a la realitat de cada àrea, ja que no existeixen dos sòls iguals. Una de les limitacions més presents ha estat el cost computacional per realitzar cada simulació, ja que al treballar amb varies matrius de dimensions tan grans el temps de càlcul incrementava considerablement.

L'objectiu principal del treball ha estat realitzar diferents simulacions, mitjançant STEP-TRAMM, en les quals es variaven una sèrie de dades entrants per tal de tenir varis resultats diferents. Aquests resultats estan ajustats a les condicions climàtiques i geològiques del 18 de juny de 2013 a la Val d'Aran i per tant s'han comparat els resultats obtinguts amb la informació real enregistrada.

Després de realitzar diferents anàlisis s'ha arribat a la conclusió que sòls impermeables com argiles o llims no proporcionen resultats acurats i que el tipus de sòl que més s'ajusta al local és el *loam*, el qual un 40% és sorra, un 40% és llims i el 20% restants és argila.

Pel que fa la qüestió de l'efecte de la vegetació, el valor trobat dista molt del que et permet introduir el model, però introduint el màxim permès i comparant-los amb altres valors ja es veu l'efecte. La vegetació hi juga un paper clau en mitigar moviments de massa ja que les arrels absorbeixen gran part de l'aigua i aturen els possibles moviments que es poguessin donar en el sòl.

En referència al grau de saturació de l'aigua, un valor mitjà com 0.35 és el més ajustat, ja que els porus tenien una certa quantitat d'aigua en el seu interior.

Per últim, el gruix de sòl ens aporta informació sobre com influeix el pes del sòl i l'aigua en cada columna. Com major sigui el gruix, major serà la càrrega de cada columna però més aguantaran els enllaços. De manera que un gruix mitjà de 1 metre és el que més s'ajusta a la realitat.

En conclusió, no hi ha hagut cap simulació que donés un resultat perfecte amb les mateixes zones de ruptures que les posicions d'esllavissades de la realitat. No obstant, amb les condicions mencionades anteriorment un 70% dels punts d'esllavissades coincideix amb les zones susceptibles a moviments de massa detectades per STEP-TRAMM.

Per tant, vist que el model té una capacitat d'èxit del 70% aproximadament, és pot dir que és una bona eina per tenir una primera idea d'identificació d'àrees propenses a desencadenar moviments de massa a causa d'episodis de pluja.





## 8 Perspectives

En aquest treball s'ha utilitzat el model com a eina d'anàlisi per tal d'avaluar una situació del passat, tot i així, l'ús de STEP-TRAMM es pot enfocar en altres àmbits.

Seguint la línia d'aquest treball, el model també es podria aplicar en la prevenció de riscos naturals. Avui en dia, el creixement demogràfic està a l'ordre del dia, per tant, una major ocupació d'àrees susceptibles a ser afectades per fenòmens naturals és molt possible, per tant s'incrementa el risc. Per tal de poder actuar de forma preventiva i mitigar el perill en persones i béns materials, cal remarcar la importància d'una bona planificació per avaluar el risc natural existent.

Com a eina bàsica per determinar zones perilloses és pot aplicar el model en una petita àrea. Anticipar-se al perill és clau a l'hora de realitzar construccions en zones que poden ser vulnerables i on ja hi han hagut escenes catastròfiques.

Per exemple, en el cas de Vielha e Mijaran. Es tracta de la capital de la comarca, i cada any, nous edificis es construeixen. En aquest cas, per tenir una visió general de la situació es podria utilitzar les dades pluviomètriques del juny del 2013 (per definir-la com a situació extrema) i ajustar uns paràmetres al sòl semblants als reals. El *Final Damage Map* ens aportaria informació sobre la probabilitat de ruptura dels enllaços i aquestes dades podrien servir per identificar les zones més vulnerables i marcar-les per prohibir-hi la construcció.

Tal i com s'observa a la Figura 57, en la zona est és on més ruptures es donarien, és a dir, on més risc hi hauria.

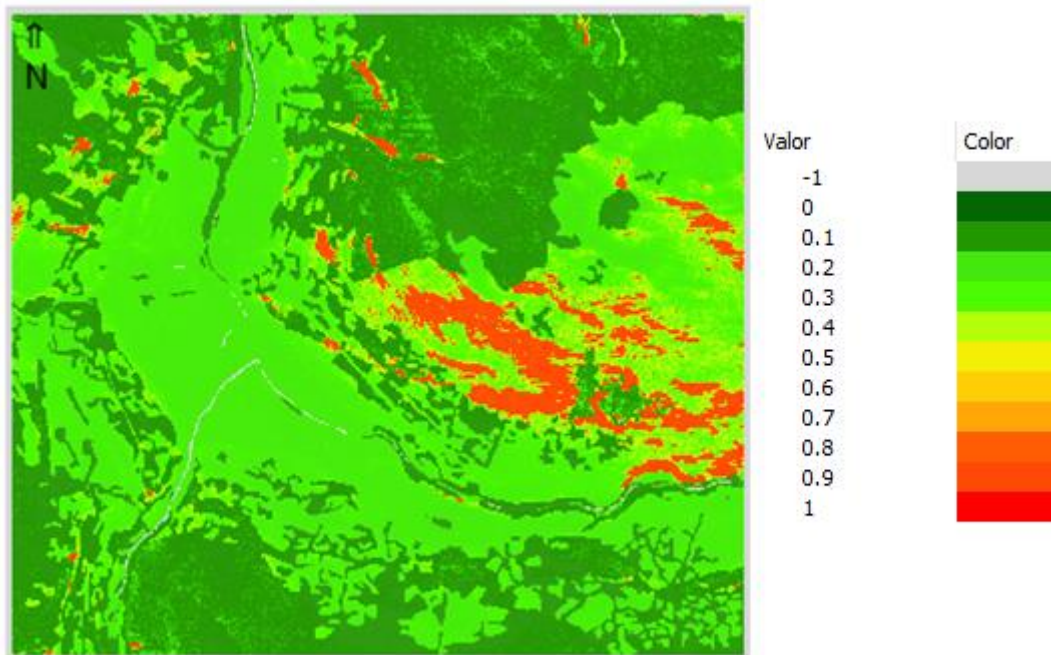


Figura 57: Mapa on es mostra el grau de probabilitat de ruptura dels enllaços a l'àrea del poble de Vielha e Mijaran. Escala: 1:36.000





## 9 Bibliografia

### ARTICLES

BOIXADERA, J., ASCASO, E., HERRERO, C., JAQUET, J. (2014). "Els sòls de Catalunya. Val d'Aran." ICGC-DAMM- Conselh Generau d'Aran.

CODER, KIM D. (2010). "Root Strength & Tree Anchorage". University of Georgia Warnell School of Forestry & Natural Resources monograph publication WSFNR10-19\*. Pp.88.

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO. "Informe de la avenida del 17 al 20 de junio de 2013 en la Cuenca de la Garona". Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

COROMINAS, J. i GARCÍA YAGÜE, A. (1997). "Terminología de los movimientos de ladera". IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Granada. Vol. 3: 1051-1072

CENTRE DE RECERCA ECOLÒGICA I APLICACIONS FORESTALS (CREAF). (2013). "Llegenda MCSC-3v2 i MCSC-4 / SIOSE-2 Codificació de les cobertes". Bellaterra, Cerdanyola del Vallès

DANJON, F., D. BARKER, M. DREXHAGE, STOKES, A. (2008). "Using three-dimensional plant root architecture in models of shallow-slope stability". *Annals of Botany* 101:1281-1293.

HENGL T, MENDES DE JESUS J, HEUVELINK GBM, RUIPEREZ GONZALEZ M, KILIBARDA M, BLAGOTIĆ A, ET AL. (2017) "SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning." *PLoS ONE* 12(2): e0169748. doi:10.1371/journal.pone.0169748.

LEHMANN, P., OR, D. (2012), "Hydromechanical triggering of landslides: From progressive local failures to mass release", *Water Resour. Res.*, 48, W03535, doi:10.1029/2011WR010947.

LEHMANN, P., VON RUETTE, J. (2018). "STEP-TRAMM. User Guide." STEP Group. ETH Zürich.

OLLER, P., PINYOL, J., GONZÁLEZ, M., RIPOLL, J. i MICHEO, M. J., (2013), "Efectes geomorfològics de l'aiguat i riuada del 18 de juny de 2013". *Gestió de les inundacions*. Barcelona, 27-28 de novembre de 2013.

PINEDA, N., PROHOM, M., SERRA, A., MARTÍ, G., GARCIA, C., VELASCO, E. I GRACIA, A. (2013) "Causes que van provocar la riuada a la Val d'Aran el 18 de juny de 2013". *Jornada. La gestió de les inundacions*, Barcelona, 27 -28 de novembre de 2013.

SERVEI METEOROLÒGIC DE CATALUNYA, (2013), "BUTLLETÍ CLIMÀTIC MENSUAL. JUNY DEL 2013". Generalitat de Catalunya, Departament de Territori i Sostenibilitat, Barcelona, 2013.



STOTHOFF, S. (2008), Infiltration tabulator for Yucca mountain: Bases and confirmation. Prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission

VALLEJO, J.I.G. (2002). Ingeniería Geológica. PEARSON

## ENLLAÇOS

INSTITUT CARTOGRÀFIC I GEOLÒGIC DE CATALUNYA. “Sistema d’informació geogràfica” [en línia]. 2013. [Consulta: novembre 2018]. Disponible a: <http://www.icgc.cat/ca/Ciutada/Informa-t/Diccionaris/Sistema-d-informacio-geografica>

VISSIR DEL INSTITUT CARTOGRÀFIC I GEOLÒGIC DE CATALUNYA.  
<http://www.icc.cat/vissir3/>

QGIS  
<https://www.qgis.org/es/site/>

STEP-TRAMM  
<http://www.step.ethz.ch/step-tramm.html>

SERVEI METEOROLÒGIC DE CATALUNYA  
<http://www.meteo.cat/>

DADES RuralCat  
[https://ruralcat.gencat.cat/web/guest/agrometeo.estacions?p\\_auth=QI86gpGp&p\\_p\\_id=AgrometeoEstacions\\_WAR\\_AgrometeoEstacions100SNAPSHOT&p\\_p\\_lifecycle=1&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-2&p\\_p\\_col\\_pos=1&p\\_p\\_col\\_count=2&AgrometeoEstacions\\_WAR\\_AgrometeoEstacions100SNAPSHOT\\_action=goEstacion](https://ruralcat.gencat.cat/web/guest/agrometeo.estacions?p_auth=QI86gpGp&p_p_id=AgrometeoEstacions_WAR_AgrometeoEstacions100SNAPSHOT&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&AgrometeoEstacions_WAR_AgrometeoEstacions100SNAPSHOT_action=goEstacion)

## REFERÈNCIES CONSULTADES I NO CITADES EN EL TREBALL

LEHMANN, P., VON RUETTE, J. (2018). “STEP-TRAMM. Data preparation.” STEP Group. ETH Zürich.

GUTIERREZ, M. (2008). “Geomorfología”. Pearson Educación. Madrid.



## Annex

Dades preses a camp referents al diàmetre de les arrels dels arbres de la Val d'Aran.

*Taula 16: Mesures preses a camp sobre la mida del diàmetre de les arrels. Aplicació de la fórmula per calcular la força a tracció de la vegetació en el sòl i el valor mitjà resultant.*

TIPUS D'ARBRE	DIÀMETRE ARRELS [mm]	FÒRMULA [MPa]	ROOT TENSILE STRENGTH [MPa]	MITJANA [Pa]
PI	65	29*D^-0,52	3.308895506	PI 2305969
	190		1.894288512	
	130		2.307530525	
	210		1.798224724	
	180		1.948302085	
	105		2.578573781	
AVET	230	29*D^-0,52	1.715139793	AVET 2399129
	70		3.183809081	
	100		2.644831434	
	160		2.071360103	
	110		2.516945441	
	135		2.262686774	
ROURE	190	29*D^-0,52	1.894288512	ROURE 1777657
	750		0.927611536	
	100		2.644831434	
	950		0.820317021	
	130		2.307530525	
	160		2.071360103	
			MITJANA TOTAL	2160918



Valors pluviomètrics de l'estació de Vielha e Mijaran dels dies 17, 18 i 19 de juny.  
Regulat pel Servei Meteorològic de Catalunya. Font: <https://ruralcat.gencat.cat>

*Taula 17: Valors pluviomètrics de l'estació de Vielha e Mijaran. Juny del 2013. Font: SMC*

DATA	HORA	PPT ACUMULADA [MM]
17/06/2013	01:00	0
17/06/2013	02:00	0
17/06/2013	03:00	0
17/06/2013	04:00	0
17/06/2013	05:00	0
17/06/2013	06:00	0
17/06/2013	07:00	0
17/06/2013	08:00	0
17/06/2013	09:00	0
17/06/2013	10:00	0
17/06/2013	11:00	0
17/06/2013	12:00	0
17/06/2013	13:00	0
17/06/2013	14:00	0
17/06/2013	15:00	0.3
17/06/2013	16:00	0.3
17/06/2013	17:00	5.1
17/06/2013	18:00	7
17/06/2013	19:00	8.8
17/06/2013	20:00	9.3
17/06/2013	21:00	9.6
17/06/2013	22:00	12.1
17/06/2013	23:00	15.1
17/06/2013	24:00	20.2
18/06/2013	01:00	25
18/06/2013	02:00	34.3
18/06/2013	03:00	46
18/06/2013	04:00	55.5
18/06/2013	05:00	68.1
18/06/2013	06:00	79.3
18/06/2013	07:00	89.1
18/06/2013	08:00	95.9
18/06/2013	09:00	101.4
18/06/2013	10:00	106.2
18/06/2013	11:00	111
18/06/2013	12:00	113.9
18/06/2013	13:00	115.8
18/06/2013	14:00	116.1
18/06/2013	15:00	116.1
18/06/2013	16:00	119.1
18/06/2013	17:00	120.1
18/06/2013	18:00	120.2



18/06/2013	19:00	120.2
18/06/2013	20:00	120.8
18/06/2013	21:00	121.2
18/06/2013	22:00	121.3
18/06/2013	23:00	121.3
18/06/2013	24:00	121.4
19/06/2013	01:00	123.9
19/06/2013	02:00	124.1
19/06/2013	03:00	124.7
19/06/2013	04:00	124.7
19/06/2013	05:00	124.7
19/06/2013	06:00	124.7
19/06/2013	07:00	124.7
19/06/2013	08:00	124.7
19/06/2013	09:00	124.7
19/06/2013	10:00	124.7
19/06/2013	11:00	124.7
19/06/2013	12:00	124.8
19/06/2013	13:00	124.8
19/06/2013	14:00	124.8
19/06/2013	15:00	124.8
19/06/2013	16:00	124.8
19/06/2013	17:00	124.8
19/06/2013	18:00	124.8
19/06/2013	19:00	124.8
19/06/2013	20:00	124.8
19/06/2013	21:00	124.9
19/06/2013	22:00	125
19/06/2013	23:00	125.5
19/06/2013	24:00	125.7